

燕麦生产全程机械化技术与装备研究进展

卢琦^{1,2} 刘立晶^{1,2} 郑德聪³ 刘忠军^{1,2} 赵金辉^{1,2} 王璐¹

(1. 中国农业机械化科学研究院集团有限公司, 北京 100083; 2. 土壤植物机器系统国家重点实验室, 北京 100083;
3. 山西农业大学农业工程学院, 太谷 030801)

摘要: 燕麦是一种粮饲兼用作物,是我国种植业结构调整的重要替代物和改善膳食结构的重要品种。针对我国燕麦生产机械化水平低,各环节发展不均衡,基础研究落后,产业化程度低,影响燕麦产业发展的生产实际,阐述了全球和我国燕麦产业现状,从燕麦全程机械化技术体系角度,分析了燕麦生产全程机械化中的薄弱环节,对国内外燕麦田间育种机械化技术与装备、机械化耕整地技术与装备、机械化播种技术与装备、机械化田间管理技术与装备、机械化收获技术与装备的发展现状进行了综述分析。就现阶段我国燕麦生产全程机械化发展存在的短板问题,建议围绕基础研究、多样化技术与装备研发、新技术推广、标准制定、产业经济效益、自动化和智能化装备等方面进行深入研究,助推燕麦产业机械化进程,促进燕麦产业标准化、产业化。研究可为我国燕麦产业的发展提供参考。

关键词: 燕麦; 产业; 全程机械化; 装备; 研究进展

中图分类号: S-1; S22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2022)S1-0118-22

Research Progress of Mechanization Technology and Equipment in Whole Process of Oat Production

LU Qi^{1,2} LIU Lijing^{1,2} ZHENG Decong³ LIU Zhongjun^{1,2} ZHAO Jinhui^{1,2} WANG Lu¹

(1. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd., Beijing 100083, China
2. State Key Laboratory of Soil-Plant-Machinery System Technology, Beijing 100083, China
3. College of Agricultural Engineering, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China)

Abstract: Oat is a kind of grain and forage crop, which is an important substitute for planting structure adjustment and an important variety to improve dietary structure in China. In view of the low level of mechanization of oat production, uneven development of various links, backward basic research and low degree of industrialization in China, which affect the development of oat industry. The current situation of oat industry in the world and China was expounded, and the weak links in the whole-process mechanization of oat production was analyzed from the perspective of the whole-process mechanization technology system. The development status of oat field breeding mechanization technology and equipment, mechanized tillage technology and equipment, mechanized sowing technology and equipment, mechanized field management technology and equipment, mechanized harvesting technology and equipment at home and abroad were summarized and analyzed. In view of the shortcomings in the development of the whole-process mechanization of oat production in China at the present stage, it was suggested to conduct in-depth research on basic research, diversified technology and equipment development, new technology promotion, standard formulation, industrial economic benefits, automation and intelligent equipment, so as to boost the mechanization process of oat industry and promote the standardization and industrialization of oat industry. It was expected to provide reference for the development of oat industry in China.

Key words: oats; industry; whole-process mechanization; equipment; research progress

收稿日期: 2022-06-05 修回日期: 2022-08-13

基金项目: 财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系项目(CARS-07-D-1)

作者简介: 卢琦(1991—),男,博士生,主要从事农业机械设计及理论研究,E-mail: sxndluqi@163.com

通信作者: 刘立晶(1976—),女,研究员,博士生导师,主要从事农业机械化研究,E-mail: xylilj@sina.com

0 引言

燕麦属于禾本科燕麦属一年生草本植物^[1-3]，具有耐寒抗旱、耐瘠薄、耐适度盐碱、不与水稻小麦等其他禾谷类作物争夺耕地，农业风险系数低等优良性状^[4-5]，是我国生态脆弱地区重要的特色粮食、饲草及救荒作物^[6]。燕麦分裸燕麦和皮燕麦，裸燕麦起源于我国，主要收获籽粒，以食用为主，远古时代就是我国人民的主粮之一^[7-10]；皮燕麦以饲用为主，其植株高大、产草量高、营养价值高、适口性好、消化率高，属优质饲料，全世界 74% 的燕麦被用作饲料^[11]。

随着我国“草牧业”、“粮改饲”、“引草入田”等农业供给侧结构性改革的推进，燕麦饲草的需求量越来越大^[12-14]；另外随着人们生活水平的提高和科学膳食观念的普及，我国燕麦食品市场需求增大。但我国燕麦生产机械化水平落后，专用机械少，作业质量差，属于起步阶段，与燕麦产业日益发展的需要不匹配。因此开展燕麦生产全程机械化技术及装备研究，对提升燕麦生产机械化水平、支撑燕麦产业健康持续发展具有重要意义。

本文阐述燕麦生产全程机械化技术与装备的研究进展，并针对目前存在的问题，提出建议和研究设想，以期为我国燕麦生产机械化发展方向提供参考。

1 燕麦产业现状

1.1 全球燕麦种植分布与规模

因燕麦喜冷凉，属低温作物，多种植在北纬 35°~50° 的欧亚大陆及北美洲的高纬度、高海拔、高寒地区，南纬 30° 以南的澳大利亚也有种植。在世界八大粮食作物中，燕麦总产量居第 5 位，年种植面积约 1 000 万 hm^2 。主要生产国或地区包括俄罗斯、欧盟、加拿大、澳大利亚、巴西、美国、哈萨克斯坦、乌克兰、白俄罗斯、中国、智利等^[6]。根据美国农业部统计，全球燕麦主产国 2016—2020 年燕麦的种植面积和产量如图 1、2 所示。

1.2 我国燕麦种植分布与规模

燕麦在我国种植分布很广，产区可划分为华北燕麦产区、西北燕麦产区、西南燕麦产区和东北燕麦产区 4 个区域。华北燕麦产区主要分布在内蒙古自治区以及河北和山西省；西北燕麦产区包括甘肃、青海、陕西省以及宁夏回族自治区、新疆维吾尔自治区；西南燕麦产区分布在四川、贵州、云南省以及西藏自治区；东北燕麦产区主要包括吉林、黑龙江、辽宁省以及内蒙古自治区东部地区^[15-16]。

根据国家燕麦荞麦产业技术体系统计^[6]，2020

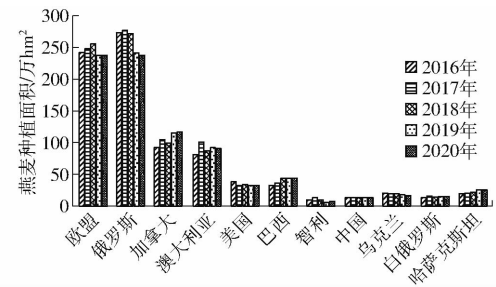


图 1 2016—2020 年全球燕麦主产国燕麦种植面积
Fig. 1 Oat planting area of major oat producing countries in world from 2016 to 2020

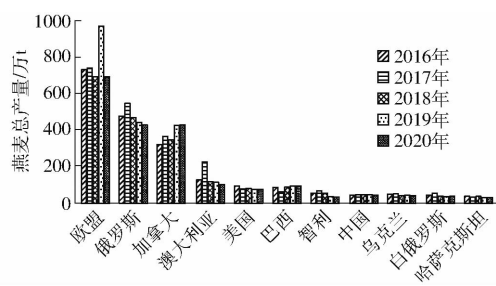


图 2 2016—2020 年全球燕麦主产国燕麦总产量
Fig. 2 Total output of oats in major oat producing countries in world from 2016 to 2020

年我国燕麦种植总面积约 76.9 万 hm^2 ，产量超 380 万 t。其中籽粒燕麦种植面积 41.3 万 hm^2 左右，总产量 75.6 万 t，居世界第 8 位，占世界燕麦总产量的 2.8%；饲用燕麦种植面积约 36.3 万 hm^2 ，总产量约为 309.2 万 t，较 2019 年产量增长 13.6%。种植总面积超过 6.67 万 hm^2 的省份包括内蒙古、河北、青海、甘肃，其中籽粒燕麦种植总面积最大的是内蒙古，约 17.6 万 hm^2 ，总产量约 28.5 万 t；饲用燕麦种植面积最大的是青海省，饲草面积超过 11 万 hm^2 ，产量约 100 万 t。2018—2020 年我国燕麦主要种植分布如图 3 所示。2018—2020 年我国燕麦主产区籽粒燕麦和饲用燕麦产量如图 4、5 所示。

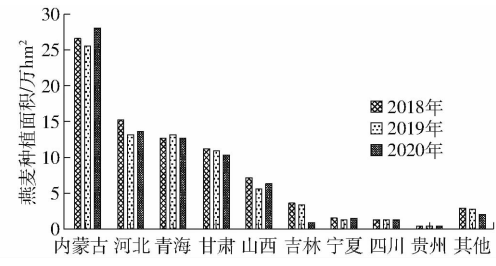


图 3 2018—2020 年我国燕麦主要种植分布
Fig. 3 Main planting areas of oat in China from 2018 to 2020

1.3 燕麦全程机械化技术体系

燕麦全程机械化技术包括种子工程、种床制备、播种、田间管理、收获、储藏运输、加工利用等环节。体系组成如图 6 所示。我国燕麦生产各作业环节机械化水平差异较大，其中种床制备、储藏运输、饲用燕麦收获等环节，机械化程度较高，其他环节如种子

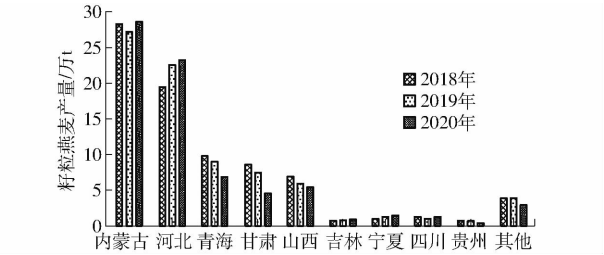


图 4 2018—2020 年我国燕麦主产区籽粒燕麦产量

Fig. 4 Oat yield in main oat producing areas in China from 2018 to 2020

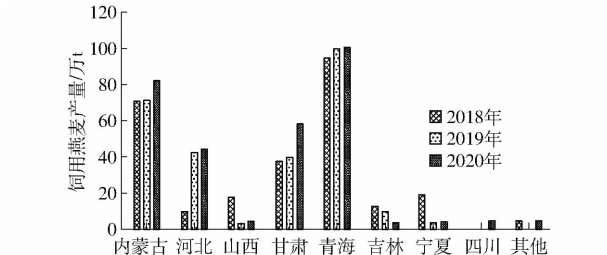


图 5 2018—2020 年我国燕麦主产区饲用燕麦产量

Fig. 5 Oat yield in main oat producing areas in China from 2018 to 2020

工程、播种、田间管理、籽粒收获和加工利用,机械化程度相对较低。另外,不同区域机械化程度差异也较大,如地势平坦、地块面积相对较大的种植区,机械化程度相对较高;丘陵山区、坡耕地等种植区,机械化程度相对较低。因此燕麦全程机械化技术发展

的重点是作业体系中的薄弱环节和丘陵山区的机械化。

本文将重点对燕麦田间育种、耕整地、播种、田间管理技术与装备和收获机械化技术与装备的研究进展情况进行阐述。

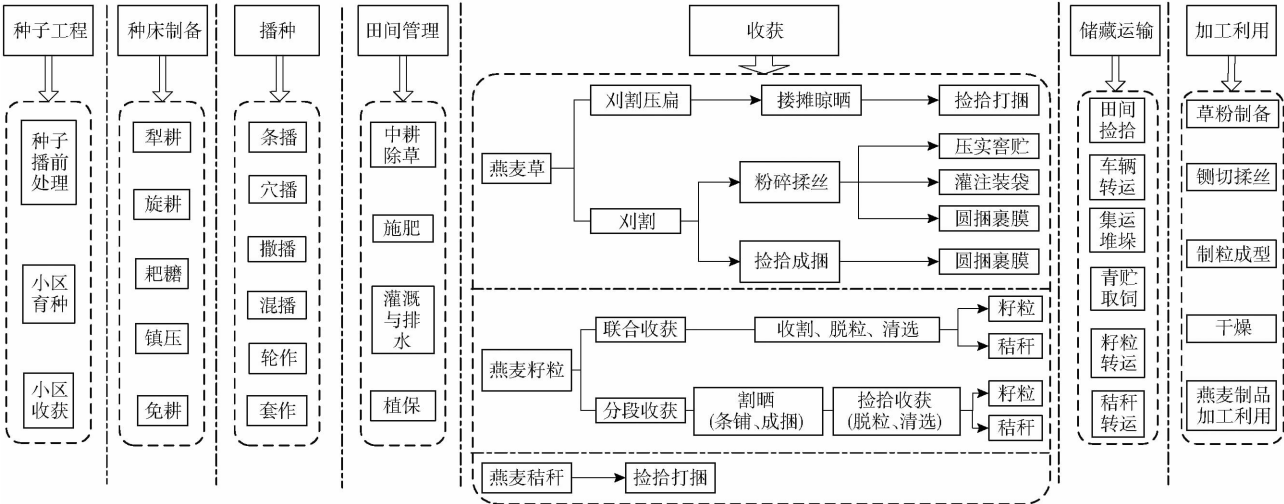


图 6 燕麦全程机械化技术体系

Fig. 6 Oat whole mechanization technology system

2 燕麦田间育种机械化技术与装备

2.1 小区机械化播种技术与装备

小区播种机是培育新品种、繁殖良种和对比品种等田间试验时所用的专用播种机^[17-20]。从 20 世纪 30 年代起,国外开始研究小区条播机。1935 年加拿大研制出世界上第一台小区条播机;随后,奥地利、美国、挪威、法国、瑞典、德国、日本和苏联等国家相继开始研究;20 世纪 60 年代,奥地利、西德、日本等国基本实现小区条播机械化作业^[21-23]。随着计算机、机电一体化、自动化等技术的广泛应用,小区播种机进入智能化、自动化时代。

目前,奥地利 WINTERSTEIGER(图 7a)、德国 HALDRUP(图 7b) 和美国 ALMACO(图 7c) 等公司^[24] 的小区育种机械化技术处于国际领先地位,国内部分科研单位引进国外先进的小区播种机,通过更换零部件或调整工作参数用于我国育种生产中,

但也主要是用于小麦育种中。



图 7 国外的小区播种机

Fig. 7 Overseas seeder for plot breeding

近年来,我国田间育种机械化取得较大进展,但

由于研究起步晚、地方差异性大等因素,种业生产装备存在功能单一、作业性能不稳定、可靠性差、智能化水平低、主要集中用于在玉米和小麦主粮上等诸多问题亟待解决。“十三五”期间,农业农村部国家

燕麦荞麦产业技术体系机械化研究室引进和研发了适用于燕麦荞麦的小区播种机,目前已在吉林白城、内蒙古、西昌、山西等燕麦荞麦育种单位进行推广和示范。主要机型如表 1 所示。

表 1 我国的燕麦小区播种机
Tab.1 Plot breeding seeder of oat in China

机具型号	实物图	主要特点
河北元氏 2BZ-6 型小区播种机		自走式结构,配套功率 18.38 kW 以上,工作幅宽 1.8 m,采用锥体格盘式排种器,一次可播 6 行,双圆盘开沟器,人工供种,作业时需 2 人配合操作,可用于区域试验播种
中国农科院 2BSH-4 型燕麦穗行播种机		手扶式结构,配套功率 5.5 kW 以上,采用弹匣式分种器和锥体格盘式排种器,铲式宽苗带开沟器,一次可播 4 行,可用穗行或株行圃试验播种
中国农科院 2BZYT6 型自走式小区播种机		自走式结构,配套功率 18.38 kW 以上,采用锥体格盘式排种器和电驱智能控制系统,行长 2~25 m 无极可调,可选配北斗辅助控制模式,无需小区画线,行长控制精度可达厘米级,可用于区域播种
中国农科院 2BX-3 型燕麦小区播种机		手扶式结构,配套功率 5.88 kW 以上,工作幅宽 1.0 m,一次性可播 3 或 4 行,采用水平锥盘式排种器,铲式开沟器,可用于小地块区域试验

2.2 小区机械化收获技术与装备

20 世纪 60 年代,国外开始研究小区收获技术,经多年发展,已逐步实现了自动化、信息化和智能化,通过物联网、传感器和信息化技术实现对其作业质量与作业状态的实时监测与自动调控。作业速度自动控制系统、智能辅助转向系统、自动驾驶系统等智能调控系统和操纵系统也在小区收获机上得到应用^[25-26],具有适用性强、智能化程度高、功能多样、技术成熟、人机交互体验感良好、系列化产业化程度高等特点^[27]。奥地利 WINTERSTEIGER 公司和丹麦 HALDRUP 公司的一系列产品在世界上较为广泛应用。图 8 为部分国外适用于麦黍类作物的小区联合收获机。

我国小区收获机械发展起步较晚,对于小区联合收获机的研究主要集中于种子籽粒的高脱净、低损伤、防混种,割台、脱粒滚筒、种箱的自净以及小区测产、小区品种试验数据获取等方面^[26,28]。戴飞等^[29-30]针对小麦种子收获问题,研制了 4GX-100 型小区收获机,并对关键作业参数进行了改进优化设计与试验。高爱民等^[31]研制了小区小麦育种收获机纵轴流锥型滚筒脱粒装置。赵丽清等^[32]研制



图 8 国外的小区联合收获机

了一种基于小区育种的收获机智能测产系统。王家胜等^[33]研制了 4LZZ-1.0 型小区稻麦联合收割机。李毅念等^[34]为解决现有小区谷物联合收获机割台中有残留、不易清机等问题,设计了一种采用正面气流将禾吹弯再切割的气吹式割台。陆荣等^[35]在立锥式小区花生脱壳机及脱壳装置基础上,设计了三通道横流气吸清选装置。我国小区联合收获机主要用于稻麦、玉米收获,其他作物收获少有报道^[24]。目前生产实际中燕麦小区收获主要仍以人工收获为主。

3 燕麦机械化耕整地技术与装备

燕麦机械化耕整地技术主要包括耕地、耙耱和镇压环节。燕麦机械化耕整地的土壤条件与其他粮食作物的土壤条件相似,所用的机械与其他粮食作物的耕整地机具基本相同。

耕地时用铧式犁进行翻耕,用圆盘耙、钉齿耙等进行耙地,将土块细碎,平整土地,为播种环节创造良好的土壤条件,也可采用深松机或免耕机进行深松或免耕等保护性耕作。深松时一般要求深度达25~30 cm,能打破犁底层,有利于作物根系的生长,增加产量,但功率消耗大,需要进一步对土壤细碎。旋耕机因其一次可完成耕整地环节,旋耕后地表平整、土壤细碎,耕后可直接进行播种作业,在我国被广泛应用。耕后的土壤可根据生产需要进行镇压处理,镇压时要求土质细碎、土表平整、土层压紧、上虚下实,达到保墒蓄水的效果。与其他作物相比,燕麦种植区域地形复杂多样,机械化水平不高,一部分地区仍在大面积使用手扶旋耕机进行耕整地作业。

国外发达国家燕麦机械化耕整地技术非常成熟,机具工作幅宽较大,以大型机械为主。考虑到机具作业成本、土壤保护及综合效率,国外往往采用复式作业机具,如耕整地联合作业机、深松整地联合作业机等。复式作业机具进地次数少,降低了对土壤的压实、团粒结构破坏小,作业效率高,但需要大功率拖拉机配套,主要生产家有约翰迪尔、纽荷兰、雷肯、阿玛松等公司。国内技术水平一般,机具以中小型为主,功能单一,多用犁、旋耕机等,主要生产厂家有新疆牧神、西安亚澳、河北圣和、保定双鹰、连云港大陆等公司。

4 燕麦机械化播种技术与装备

4.1 燕麦种植农艺

合理的种植农艺可以使燕麦增产丰收,应根据不同地区、不同生长条件选择适宜的农艺要求。一般而言,燕麦播种方式有撒播、条播、穴播、覆膜播种,种植模式有混播、作物间轮作和套作等。

撒播一般适用于小农经济模式,主要应用在坡度较大的丘陵山区和高海拔地区。条播时,食用或

种用燕麦一般播种行距为25~30 cm,如采用机械化中耕管理作业,行距30~40 cm,播量一般在150~225 kg/hm²,播深3~5 cm;饲用燕麦一般播种行距为10~15 cm,播量为225~300 kg/hm²。播种时应根据当地气候环境适时播种,当错过最佳播种期时,播种量应适当增加,以保证单位面积株数和产量。穴播时,播种行距15~20 cm,穴距10 cm左右,穴粒数3~5粒,每公顷播量150 kg左右。覆膜播种一般用在低温和干旱半干旱地区,起保温保墒作用。燕麦常采用轮作的方式减少病虫害的发生,前茬作物可为甜菜、大豆、土豆等,以豆科植物最优。饲用燕麦混播、套作时,有利于土壤养分和饲草产量的增加,提高饲草品质,一般选用豌豆、箭舌豌豆、红豆草、毛苕子等豆科植物混播,也可选用黑麦草、紫花苜蓿、马铃薯、油菜等套作。

4.2 燕麦机械化播种技术与装备

我国燕麦机械化播种水平不高,专用机械装备较少,多数借用小麦播种机。存在的主要问题是:皮燕麦带壳,籽粒流动性差,易导致种箱内架空造成种子流中断,影响充种效果;在排种和输种过程中易产生卡滞,造成堵塞,影响排种质量;排种器与籽粒相互作用,易损伤胚芽,影响出苗;农机与农艺不匹配,机具的适应性差。目前燕麦机械化播种方式以条播为主,少量穴播。

(1) 条播技术与装备

我国燕麦条播机普遍应用外槽轮式排种器,它具有良好的适应性。可根据不同地区燕麦的种植农艺,通过调整槽轮的有效工作长度、结构尺寸来适应燕麦播种。如2BXF-6型多功能谷物播种机^[36](图9a),采用钉轮式排种器和圆盘开沟器,可选配宽苗带圆盘开沟器、方圆管镞角开沟器、弹簧腿开沟器等,种肥分施。文献[37~38]为解决丘陵山区小地块燕麦播种问题,研制了以履带式 and 手扶式拖拉机为动力设备的悬挂式燕麦条播机,有效地改善了播种质量差的问题。国外的燕麦条播机主要采用气力集排式排种系统,可通过调整气流速度来调整燕麦的播量。在大中型播种机上使用较普遍,一般适合大面积、高效作业,可一次实现整地、镇压、播种等联合作业,播种精度较高,作业适应性强,作业幅宽



图9 我国的燕麦播种机

Fig. 9 Oat seeder in China

可达 3 ~ 9 m,但价格相对昂贵。代表机型如表 2 所示。

表 2 国外的燕麦播种机
Tab.2 Examples of foreign oat seeder

机具型号	播种方式	实物图	主要特点
奥地利博田 TERRASEM 型播种机	条播		采用气送式集中排种、排肥方式,整机可实现整地、施肥、播种、镇压联合作业,双圆盘下压力 40 ~ 120 kg 可通过液压统一调节,下种量 9 ~ 5 250 kg/hm ² 可调,适用于大豆、小麦、大麦、燕麦、油菜等,作业幅宽 3 ~ 9 m
阿玛松 Cirrus4003 - 2 型大型免耕联合播种机	条播		采用气吹式排种、排肥方式,作业速度最快可达 20 km/h;播种单元独立仿形,精准限深,播深稳定,最小行距可达 12.5 cm,适合大面积作业,价格昂贵
格兰 S - drill 系列气吹式条播机	条播		配套功率 117.6 kW 以上,可实现整地、播种、镇压联合作业,不具有施肥功能;整地采用动力耙,可拆开单独使用;气吹式排种方式;地轮配有制动系统,防止地头种子损失;播种行距 12.5 cm,工作幅宽可根据动力选择

(2)穴播技术与装备

燕麦穴播机主要应用鸭嘴式穴播器。不同地区根据当地农业生产状况,特别干旱半干旱地区应用铺膜穴播机,如 2B - 11 型苜蓿燕麦整地镇压精量穴播联合作业机(图 9b),一次可完成 11 行的播种作业,播前先进行地表整平和镇压作业,采用弹簧鸭嘴式穴播单体完成穴播作业,另外可根据区域农艺需要,进行覆膜、膜上打孔、一穴多粒播种。

国家燕麦荞麦产业技术体系相关专家为探索适合机械化作业的燕麦高产栽培模式,开展了机械装备试验研究,形成了一些可推广的典型机具。如中国农业机械化科学研究院集团有限公司、赤峰市农牧科学研究院^[39]等专家针对目前燕麦多采用传统开沟器形成宽 4 ~ 5 cm 的种沟,不利于燕麦形成群体冠层结构、提升燕麦群体光合作用、形成有效分蘖,进而限制燕麦单产量的问题,设计了一种宽苗带燕麦条播机(图 9c),试验结果表明安装宽苗带开沟器的宽幅条播种植作业效果较好,各个测试点的出苗数差别较小,燕麦产量增幅为 14.3%^[40]。中国农业机械化科学研究院集团有限公司刘立晶团队设计了一种燕麦宽窄行播种机(图 9d),试验结果表明,燕麦宽窄行条播技术比传统行距播种增产 10.84%。刘立晶团队针对燕麦免耕的农艺要求,研发了 2BMG - 14 型燕麦免耕播种机(图 9e),采用控制式密齿型排种器,实现燕麦精少量排种,节约种子;采用波纹圆盘破茬松土开沟后整理出松软种床,双圆盘开沟播种并有镇压轮控制开沟深度,较好地保证种子播种深度一致性,播种后及时镇压使种子与湿土紧密接触,达到适宜的坚实度,镇压效果良好。该机型在吉林省白城市开展的免耕秋季复种燕

麦饲草试验过程中,防堵性能好、破茬能力强、出苗整齐、作业效率高。

5 燕麦机械化田间管理技术与装备

燕麦的机械化田间管理技术主要包括除草、追肥、灌溉与排水、植保等措施。在绿色种植理念下,一般不建议使用除草剂,而且燕麦对除草剂反应敏感,除草剂会使燕麦籽粒带壳率增加,使用不当会导致其产量和品质下降,种植规模小时一般采用人工除草,种植规模大时可采用机械除草。根据土壤的肥力和燕麦长势决定是否需要追肥。燕麦主产区一般都在冷凉地区,很少发生病虫害。病害主要有黑穗病、红叶病、锈病;虫害主要有蚜虫、黏虫、蛱蝶、金针虫等^[41]。本着“预防为主,综合防治”的植保方针,一般采用选择抗病性强的良种、播前拌种、合理轮作等方法进行绿色防治。

我国燕麦一般都种植在冷凉地区、丘陵山区等,加之燕麦具有耐寒抗旱、耐瘠薄、耐适度盐碱的特点,根据燕麦的生产实际现状,综合考虑经济效益,种植户一般在田间管理环节不过多投入。

6 燕麦机械化收获技术与装备

根据燕麦的不同用途,燕麦机械化收获技术分为燕麦籽粒机械化收获和燕麦饲草机械化收获。

6.1 燕麦饲草机械化收获技术与装备

燕麦鲜草长期保存困难,以调制成青贮饲料和干草为主。燕麦饲料的种类主要包括燕麦青贮、燕麦青干草和燕麦秸秆^[42-43]。根据不同燕麦饲料种类的制备,燕麦饲草机械化收获技术可分为燕麦青贮机械化收获、燕麦青干草机械化收获、燕麦秸秆机

械化收获。

6.1.1 燕麦青贮机械化收获技术与装备

燕麦青贮不仅具有青绿多汁、适口性好、耐储藏、消化率高、粗蛋白含量高等特点,还具有易收获、易调制、机械化程度高、天气影响小等优点,因而在国内外广泛应用^[11,44-45]。我国燕麦青贮技术主要包括窖贮、袋装青贮、拉伸膜裹包青贮^[46]。

6.1.1.1 燕麦窖贮技术与装备

窖贮是最易操作的、最传统的一种燕麦青贮技术,贮藏量大,便于人工或机具装填压紧和取料。燕麦窖贮技术一般先将燕麦草切碎,形成2~3 cm的碎段,然后入窖压紧,再密封处理,燕麦窖贮技术的一般工艺流程为青贮饲料收获、运输、装填、压实、密封、管理。

目前青贮饲料收获主要有3种方法:人工作业、半机械化作业和机械化作业。人工作业和半机械化作业一般用在机械化水平较低和种植规模较小的丘陵山区和个体户。所用机械主要包括铡草机、青饲切碎机、秸秆切碎机等饲草切碎机。其中大型铡草机便于抛送青贮料,多为轮刀式;小型铡草机多为滚刀式^[47]。我国现有的饲草切碎机主要包括滚刀式和轮刀式(圆盘式)切碎机。国外以联合收获机上的切碎装置为主要研究对象,尚未对饲草专用独立

切碎机械进行深入研究。机械化作业指由青贮饲料收获机在田间一次性完成收割、切碎、揉搓并将切碎作物抛送至运输车,主要分自走式和悬挂式两大类型。自走式机型具有独立的行走底盘,主机可配带不同的割台对多种作物进行收获;悬挂式机型是与拖拉机配套使用,主机一般配有矮秆割台、对行(不对行)式割台、捡拾器等附件。

目前,我国还没有专用燕麦青贮饲料收获机,均是直接采用或对玉米、牧草等青贮饲料收获机进行简单改造来实现燕麦青贮饲料的收获,主要机型见表3。通过机械实现对农作物切碎、挤压和揉搓,并集中处理,显著减少青贮饲料前期收获和加工的工作量,且青贮饲料的品质也得到快速提升,但切碎质量和籽粒破碎效果无法满足中高端用户需求,需在关键部件上加快研发进程^[48],另外国内机型的自动化、智能化水平有待提升。国外燕麦青饲料收获机已实现大型化,主要往大功率、宽割幅、高效率、优性能、高可靠、自动化、智能化等方向发展,大多机型安装有智能控制系统,可实现割台仿形、金属和石块探测、切段长度多级可调、滚筒自动对刀磨刀、抛料自动跟车、工作效率测量、定速巡航和自动对行等功能^[48-49]。主要机型见表4。

表 3 我国的青贮饲料收获机

Tab.3 Examples of silage harvester in China

机具型号	实物图	主要特点
中机美诺 9265/9800 型自走式饲料收获机		更换往复式割台,集喂入、压扁于一体,使饲料适口性好,操作灵活方便,动刀采用弯刀、切碎角度好、省功,割茬低、维修性好、抗堵塞,可选配籽粒破碎装置
中农博远 4QZ-3040 型青贮饲料收获机		用于田间直立秸秆的青(黄)贮收获,作业时能将切割、输送、切碎、籽粒破碎、抛送、集草等作业一次完成;割台、喂入采用液压技术,幅宽 3 m,割茬高度不大于 150 mm;铡切长度 8~28 mm 可调,设有籽粒破碎和二次抛送机构
新疆牧神 4QZ-3000X 型自走式青(黄)贮饲料收获机		整机功率 247 kW,采用不对行收获,工作幅宽 3 m,纯生产率 40~80 t/h,切碎长度 7~35 mm 可调,可对矮秆倒伏及杂草多的作物进行收割作业
中联重科 FS80-2/5(9QZ-16)型青饲料收获机		配有适用于青草和谷物的两种快速挂接割台,割幅 4~5 m,割茬不大于 120 mm,切碎刀片采用滚刀式结构,切断长度 10~30 mm,切碎滚筒转速 1 200 r/min
新疆中收农牧 9LRZ-2.7 型自走式青(黄)贮收获机		可一次性完成对作物秸秆低割、揉搓、粉碎、均衡分离、灰尘清理、抛送装箱、高低隙卸草等作业,解决了秸秆适口性差、分段作业费用高等问题;秸秆切碎机构采用双滚筒式,工作幅宽 2 750 mm,割茬高度不大于 150 mm

6.1.1.2 燕麦袋装青贮技术与装备

燕麦袋装青贮是利用特制塑料袋将燕麦青饲料封闭起来,在厌氧的环境下利用乳酸菌的发酵形成青贮饲料的过程^[50-52]。

袋装青贮一次性投资少,密闭性能强,原料密度

大,袋装之后很快进入厌氧状态^[53-54],对保存青贮料营养物质和提高综合效益有重要作用^[55]。袋装青贮产品体积小,质量轻,便于搬运、贮藏,在饲喂过程中青饲料不浪费,利用率高,比较适合在小散微养殖户中推广^[56-57]。其工艺流程为青饲料收获、拉

表 4 国外的青贮饲料收获机
Tab. 4 Examples of foreign silage harvester

机具型号	实物图	主要特点
德国克拉斯 830 - 900 系列 自走式青贮饲料机		功率为 235.9 ~ 444.7 kW;可提供无行距割台、直切割台、拾禾器及有行距青贮玉米割台以满足不同作业需要;喂入系统采用 4 个滚筒并配有金属检测装置,以防止金属破坏高速旋转的刀片或金属进入物料中造成牲畜死亡
纽荷兰 FR 系列青贮饲料收 获机		动力输出轴转速分别为 424 ~ 824 r/min,割台刀片数量 16 ~ 24 个,割台为立式,喂入辊宽度为 850 mm;集金属探测器、自动磨刀系统和定刀调整等多种青贮收获核心技术于一体
美国约翰迪尔 8400 型自走 式青贮收获机		最大功率为 397 kW,喂入装置由 4 个喂入辊组成,喂入辊宽度为 685 mm,喂入室宽度 660 mm,采用无级可调切割长度控制系统,切碎长度 6 ~ 22 mm
德国 KEMPER 公司悬挂式 青贮饲料收获机		该系列机具配套功率为 50 ~ 100 kW,割幅 1 ~ 3 m,主机可配带对行及不对行割台,生产效率一般为 15 ~ 30 t/h;可以在拖拉机的前方、后方和侧面悬挂作业

运、卸料、灌装、封存。

袋式青贮灌装机在欧美发达国家应用广泛,如奥地利 Silospeed G4 - 06 型青贮灌装机和德国 Ag - Bagger 系列青贮灌装机等,但是由于贮存袋比其他塑料产品昂贵,不适合 3 年以上的长期贮存^[47]。

我国对袋装青贮灌装机的研究起步相对较晚,目前国内没有针对燕麦青饲专用的袋装青贮灌装机,均是采用其他牧草或秸秆的装袋机。北京市农业机械试验鉴定推广站开发了 9LT - 50 型青贮饲料袋式灌装机,与传统窖贮相比减少青贮损失 20%,样机费用降低了 1/3 左右^[58]。王亚波等^[59]对 9SYG - 2 型青贮饲料灌装机玉米秸秆袋贮加工工艺进行了研究。郑泽颖等^[60]设计了一种青贮灌装平台,实现了青饲运输拖车与青贮灌装机有效地匹配,降低了劳动强度。万其号等^[61]设计了一种自走式牧草青贮联合装袋机,装袋密度可达 320 kg/m³。文献^[62]设计了一种高密度袋式青贮灌装机,增大了青贮压实密度和均匀度,保障了青贮饲料质量。徐志强等^[63 - 64]设计了一种螺旋压缩输送装袋机,可完成粉碎后的棉花秸秆喂入、搅拌、输送、压缩、装袋等作业。为实现青贮料装袋机对青贮料的搅拌、输送以及取袋、撑袋、套袋等生产过程自动化。赵云汉等^[65]基于 PLC 设计了青贮料装袋机控制系统。

6.1.1.3 燕麦拉伸膜裹包青贮技术与装备

拉伸膜裹包青贮是将刈割切短后的燕麦草原料进行高密度压实、打捆、缠网,然后通过包膜机用青贮专用膜密封裹包起来,进而创造出一个最佳的发

酵环境^[66 - 67]。其具有制作速度快、转运方便、不受时间地点限制、密封性好、乳酸菌发酵充分、营养价值高、饲草浪费少、不污染环境、适口性好的优点^[68 - 70]。裹包青贮技术在美国、欧洲及日本等国家已被认可并广泛应用,但在我国还处于起步阶段。

目前针对燕麦拉伸膜裹包青贮的方式主要有两种,一种先将燕麦草打成高密度草捆后进行缠膜,国内外多采用圆捆进行包膜;另一种方式是一次完成燕麦草的打捆缠膜裹包作业。所涉及的设备主要有圆捆打捆机、缠膜机、打捆缠膜一体机。

(1)圆捆打捆机

圆捆打捆机可以将散状饲草料制成圆柱形捆状物。圆捆打捆机没有打结器,结构相对简单,具有机型体积较小、适应性强、操作维修简单和造价低廉等特点。我国相关学者围绕圆捆打捆机结构设计、成型参数与机理、成捆方法、防缠机理等开展了研究。王春光等^[71]设计了一种钢辊外卷式圆捆打捆机和钢辊预压式圆捆机。高东明等^[72 - 73]为提高青贮饲料的打捆作业效率和作业质量,在现有青贮饲料打捆技术的基础上,设计了一种用于青贮作业,由喂料预压机构、对数螺线式二次压捆机构组成的对数螺线式圆草捆成捆装置,并对辊杠式圆捆机在不同的参数设置、物料条件以及操作参数条件下的青贮打捆功耗及效率进行了研究。刘晓等^[74]针对我国秸秆打捆机工作效率低下的问题,对喂入式秸秆圆捆机的料仓、传送带、压辊滚筒、绕绳机构、放捆装置等部件进行设计优化。尹建军等^[75]针对小型圆捆机

捆草与卸捆过程依赖操作人员频繁回头观察并手动操纵的问题,设计了由行程开关、单片机、电动缸操纵机构和蜂鸣器组成的捆草一键卸捆自动操纵与报警装置。刘家君等^[76]为解决自走式圆捆机在作业过程中,因喂入量过高使得圆捆机易发生堵塞故障的问题,设计了以作业主轴负载为反馈信号,以闭式液压驱动系统为执行部件的喂入量控制系统。王德福等^[77-85]先后对钢辊式圆捆机的打捆结构、成捆过程、捆绳机构,卷捆功耗中关键生产信息的提取方法,作物秸秆与圆捆机钢辊间滑动摩擦特性,卷捆过程中缠辊现象的发生机理,打捆过程旋转草芯的形成过程及影响因素进行了研究,还将多场耦合理论

引入钢辊式圆捆机卷捆过程分析中。

国内生产圆捆打捆机的企业主要有中机美诺、蒙拓科技、中联重科、星光玉龙、上海世达尔、中国农业机械化科学研究院呼和浩特分院等公司,主要机型与特点如表 5 所示。

国外生产的圆捆机在机械结构、动力配套、液压系统和控制系统等方面都各有其特点,产品已系列化生产,作业效率高,自动化程度高,代表了国际领先的技术水平^[86-87]。目前,生产圆捆打捆机的国际著名农机生产商有德国的 Claas、Krone,美国的 John Deere、Agco、Case New Holland,法国的 Kuhn,挪威的 Kverneland 等公司^[88-89],主要机型见表 6。

表 5 国内的圆捆打捆机

Tab. 5 Examples of round balers in China

机具型号	实物图	主要特点
中机美诺 5120 型圆捆打捆机		工作效率高,可达 15~30 捆/t,使用范围广,适用各种软秆作物(牧草、甘蔗叶、麦秸、稻秸、豆秸等);打捆直径可调,密度可调,自动卸捆;绕线准确可靠,绕线间距可调;宽幅、低平弹齿捡拾器动作轻柔,捡拾准确可靠,可最大程度减少作物损失
蒙拓 9YT-1180 型圆捆机		实现了不间断打捆作业,捡拾、捆网、吐捆等动作全部在设备行走中同步进行,该机型作业效率是以往圆捆机的 5 倍
中联 9YY-1000 型圆捆打捆机		全液压操作系统,操作方便灵活;手持调控器可实现成捆、可调缠网、落刀割网、自动出捆过程连续自动化;配套功率 66.2 kW 以上;草捆尺寸 1 m×1 m;纯工作小时生产率 3 000 kg/h 以上
华德牧草 9YGJ-2.2 系列圆草捆打捆机		适用范围广,工作性能可靠;采用智能控制系统,减少人力操作,方便用户使用,具有故障诊断报警功能,可选装 GPS 模块实现实时监控圆捆机作业;草捆密度大;采用连续强制喂入系统,喂入量大、防堵塞;配套功率 75 kW 以上
上海世达尔 9YGQ-1.2 型圆捆打捆机		适合饲草捡拾打捆作业,配套功率 44~88 kW,草捆尺寸 1.2 m×1.22 m;采用液压装置控制进草口底板角度,减少堵草;压草辊筒可将捡拾过程中翻腾的草料向下覆压,提高喂入效率;旋转型转子刀组在切断草料时,同步输送至喂入平台
星光玉龙 9YYD-1.25 型圆草捆打捆机		采用无凸轮盘、无弹齿梁结构的捡拾系统,大大降低了捡拾器故障率;配套功率 75~88 kW;生产率 40 捆/h;捆网尺寸(长×宽)2 600 mm×1 245 mm

(2) 缠膜机

缠膜机作为拉伸膜裹包青贮技术应用的载体被不断研制和开发。国外一些大型农机企业生产的缠膜机有专用于圆草捆打捆机、方草捆打捆机、也有圆捆和方捆一体机。圆草捆缠膜机有代表性的国家主要有美国、英国、澳大利亚、爱尔兰、意大利、日本和韩国等,缠绕圆草捆直径在 0.9 m 以上的为大型缠膜机,其结构比较复杂,作业效率高,自动化程度高^[67]。国外机具在我国实际应用存在一定问题:与我国动力机械配套性差;对不同地区的耕地条件、农艺要求适应性差;价格昂贵;售后服务及配件供应渠道不畅通^[66]。

我国缠膜机以小型、圆捆为主,草捆直径为 0.5~1.2 m,长度主要为 0.75~1.2 m,草捆密度小,自动化程度不高,效率较低^[90]。苏佳佳等^[91]针对我国传统牧草收贮工艺落后、营养成分损失严重等问题,研制了 9YM-1.5 型圆草捆缠膜机。杜韧等^[92]设计了配套功率 8.8~13.2 kW、草捆直径 0.5 m 的圆草捆缠膜机。刘晓等^[74]针对我国青贮包膜机工作效率低下的问题,设计了一种青贮圆捆包膜机,适用于直径 0.8~1.0 m 的圆草捆。杨星^[90]针对包膜青贮技术要求,设计转臂式圆草捆包膜机。国内外常见的缠膜机见表 7。

表 6 国外的圆捆打捆机
Tab.6 Examples of foreign round balers

机具型号	实物图	主要特点
克拉斯 ROLLANT 系列圆捆机		圆捆机捡拾宽度 2.1 m,打捆速度达 50 t/h,压辊室有 16 个钢制压辊,配备高强度压草辊,可实现高的草捆密度,草捆规格 $\phi 1.25\text{ m} \times 1.20\text{ m}$,整机可靠性和耐用性好
科罗尼 Comprima - F125XC 型圆捆捡拾压捆机		牵引式,配套功率 88 kW 以上,捡拾宽度 2.15 m,草捆规格 $\phi 1.25\text{ m} \times 1.20\text{ m}$,工作效率 40 ~ 60 捆/h
约翰迪尔 F441R 型圆捆机		配套功率 73.5 kW 以上,捡拾器宽度 2 m 或 2.2 m,草捆直径可在 1.25 ~ 1.35 m 之间调节,宽度 1.21 m,草捆密度可调。拖拉机内配备打捆控制及监视系统,可直接控制牧草捡拾、打捆、成型、草捆直径调节和草捆抛出等操作,按键控制方便快捷
格兰 9Y-2.2 型圆捆机		配套功率 88 kW 以上,捡拾宽度 2.2 m,喂入切刀 14 把,喂入切刀配备自动复位弹簧保护装置;压捆室内 17 个重载型压扁辊,可获得高密度草捆,草捆规格 $\phi 1.25\text{ m} \times 1.2\text{ m}$;采用先进的 Focus 型电子控制装置,可预设草捆密度,也可监控草捆机工况
麦赛福格森 RB3130F 型圆捆机		配套功率 88 kW 以上,非凸轮捡拾器,5 排长弹齿,17 把切刀,弹簧+液压油缸综合浮动防排堵系统;18 根一体成型压捆辊,螺旋形旋转加压的压捆室,带精准传感器的尾门锁止钩,草捆规格 $\phi 1.25\text{ m} \times 1.23\text{ m}$
纽荷兰 BR6090 型圆捆打捆机		配套功率 73.5 kW 以上,捡拾器宽度 2 m,112 个弹齿,配有浮动弹簧,可以根据作物和地况进行调节;链板草捆成型机构和鸭嘴型缠网系统,草捆规格 $\phi 1.25\text{ m} \times 1.2\text{ m}$
库恩 VB2200 系列圆捆打捆机		配套功率 58.8 kW 以上,捡拾器宽度 2.1 ~ 2.3 m,草捆直径 0.8 ~ 1.6 m,宽度 1.2 m,采用 Progressive Density 技术,拉力随捆包变大而增大,使得捆包更加结实,且拥有致密的外层

(3)打捆包膜一体机

国外打捆包膜一体机已经日趋成熟,既可固定喂料作业,也可捡拾作业。国内目前圆捆缠膜一体机多以小型机为主。张将等^[93]设计了一种集青贮、打捆、缠膜多功能与一体的自走式青贮打捆缠膜一体机,草捆密度 150 kg/m³ 以上;打捆形式为圆形捆,打捆规格为 90 cm × 120 cm (直径 × 长度),单捆缠膜数为 2 ~ 6 层。刘晓^[94]设计了 4QZY-20 型自走式青饲料打捆包膜一体机,打捆规格 100 cm × 85 cm。张德学等^[95-98]研发了一种拖拉机牵引式 9YYB12 型青贮饲料打捆缠膜一体机,配套功率 48.5 kW,圆捆尺寸 120 cm × 100 cm,缠膜 4 ~ 6 层。国内外常见的打捆缠膜一体机见表 8。

6.1.2 燕麦青干草机械化收获技术与装备

青干草调制作为畜牧业生产的传统办法,可以把饲草从旺季保存到淡季,能够解决丰草期大量牧草霉烂、枯草期饲草缺乏等问题,且具有简便易行、成本低、便于长期大量储存等优势,是解决草畜平衡问题的一项重要措施^[99]。青干草由于养分保存好、适口性好、消化率高、使用方便被大多数养殖

户接受,调制良好的燕麦青干草能较完整地保存青绿饲料的营养成分^[43,100-101]。一般自然干燥而成的青干草可保存鲜草 50% ~ 70% 的养分,人工干燥制成的青干草可保存鲜草 90% ~ 93% 的养分^[102]。但人工干燥成本较高,目前燕麦青干草制备主要采用自然干燥方式。燕麦青干草的制备过程是先将燕麦饲草进行适时刈割,然后由田间搂摊晾晒进行干草调制,再用打捆机打捆后,进行储藏。主要工艺流程包括燕麦草刈割、自然干燥、打捆、储藏、管理。所用到的机具主要包括燕麦割草机、搂草机、打捆机。

(1)割草机

割草机按切割原理可分为往复式和旋转式,往复式割草机具有功率消耗较小、割茬低而整齐、重割率低、饲草损失较小等特点,但其振动不易平衡、作业速度相对较低。旋转式割草机切割速度高,可实现高速作业,适于高产饲草的收获,在湿度密度大,倒伏严重等恶劣条件下也能可靠工作,但重割率高、割茬不齐^[103-104]。

我国割草机研究起步晚,与国外相比,我国割草

表 7 国内外的缠膜机

Tab.7 Examples of wrapping machines

机具型号	实物图	草捆尺寸(直径×长度)/cm
库恩 RW 1610 系列圆草捆缠膜机		120 × (100 ~ 150)
格兰 7850 型圆捆包膜机		120 × 150
美国威猛 SW5000 型缠膜机		120 × 150
上海世达尔 9BM 系列包膜机		(50 ~ 90) × (70 ~ 125)
五征 SW1120D 型包膜机		(85 ~ 110) × (85 ~ 110)

表 8 国内外的打捆缠膜一体机

Tab.8 Examples of single pass silage round wrapping machines

机具型号	实物图	主要特点
纽荷兰 RB125 Combi 型圆捆打捆包膜一体机		配套功率 88 kW,可一次完成捡拾、打捆、包膜作业,适用于青贮打捆包膜作业,包膜材料为网或塑料薄膜,捡拾宽度 230 cm,草捆直径 125 cm,草捆宽度 122 cm
库恩 FB3130 – FB3135 型圆捆打捆缠膜机		可一次完成捡拾、打捆、包膜作业,具有整体式切割喂入转子,打捆室有 18 个 Power Track 辊轮,从驾驶室控制打捆和缠网全过程,草捆直径 125 cm,草捆宽度 122 cm
克拉斯 ROLLANT 系列圆捆缠膜机		可一次完成捡拾、压捆、缠膜作业,ROTO CUT 旋转切割系统具有重载刀辊和刀组切换功能,可在驾驶室内进行操控,适用不同作物收获;辊表面带棱纹凸起,对草捆驱动力更强,可实现高的草捆密度,草捆直径为 1.25 m
科罗尼 Comprima CF155XC 型打捆缠膜一体机		可一次完成捡拾、压捆、缠膜作业,适于半干青贮收获,独立的液压系统,工作更稳定,效率更高,打捆直径 1.25 ~ 1.5 m 可调,适合不同客户的需求,高强度链板打捆系统,效率更高,故障率更低
上海世达尔 TSW2020C 型打捆包膜一体机		配套功率 37 ~ 73.5 kW,捆包尺寸 φ100 cm × 100 cm,作业效率 20 ~ 30 包/h,青贮膜尺寸 50 cm × 1 800 m
五征 4QYM – 1210 型打捆包膜一体机		配套功率 25.7 ~ 73.6 kW,圆捆尺寸 φ115 cm × 100 cm,膜尺寸宽度 50 cm × 1 800 m

国外割草机相对较成熟,具有作业幅宽大、切割装置转速高、割茬低且整齐、仿形效果好、自动化智能化程度高、工作可靠、故障率低等优点,常见的割

机还存在产品品种单一、自动化程度低、技术性能不稳定、可靠性差等问题^[104]。燕麦作为禾本科牧草,其茎和叶的干燥速度虽然相差不大,但是经过压扁后,干燥时间大大缩短,能有效降低营养物质的损失^[105],因此在燕麦刈割时也进行压扁处理。高东明等^[106]针对割草调制机的压扁辊在机械调制作业过程中出现的不易调节问题,设计了一种新型割草调制机构,以提升作业效果和作业可靠性。赵春花等^[107]研制了一种既能宽幅收获,又可高速作业的高速齿型链式割草压扁机,切割速度可达 7.5 m/s。邬备等^[108]为了降低收获过程中的牧草损失,选择最佳的割草压扁机设计参数,对割草压扁机割刀转速和压扁辊转速及其匹配对苜蓿收获质量的影响进行了研究。陈凯等^[109]针对牧草压扁机作业过程中压扁间隙调节困难等问题,设计了一种新型牧草压扁机间隙调节装置。杨天兴等^[110]针对大中型牧草收获机械不能适应小地块种植的牧草收获作业,研制了一种可一次完成拨禾、切割、压扁、输送和集条铺放的小型割草压扁机。凌旭等^[111-112]针对丘陵山区牧草收获作业质量差的问题,对小型割草压扁机的仿形装置和手扶山地割草压扁机的拨禾轮进行设计和研究。

草机生产厂家有 John Deere、New Holland、Agco、Kuhn、Class、Macdon 等公司。国内外常见的割草机如表 9 所示。

表 9 国内外的割草机
Tab.9 Examples of mowers

机具型号	实物图	主要特点
约翰迪尔 630 型割草机		牵引式,配套功率 48 ~ 60 kW,可以一次性实现切割、压扁、铺条 3 种作业功能,割刀齿轮传动,切割宽度 3 m,圆盘转速 2 650 r/min,压扁辊宽度 187.8 cm,草条宽度 0.9 ~ 1.98 m
格兰 4300 系列割草机		牵引式,配套功率 80 kW 以上,压扁宽度 2.4 m,放铺宽度 0.8 ~ 2.2 m,采用超级浮动保护装置,越障能力强,采用双悬挂装置,刀盘系统和压扁装置与机架相互独立,仿形能力强,可适用于各种地况,可选打击齿压扁器,适合燕麦收获
库恩 FC302/352 型割草机		牵引式,配套功率 67 ~ 80 kW 以上,幅宽范围 2.50 ~ 3.50 m,可调整条铺宽度;人字形橡胶压扁辊,可根据作物的密度和湿度调整压扁辊的压力
中国农机院呼和浩特分院 9GBXQ-3.0 型旋转式切割机		牵引式,配套功率 51 kW 以上,割幅 3 m,刀盘转速 2 980 r/min,刀盘装有自动保护装置,人字形胶辊,压扁率高,切割器可调整割茬高度和角度且有很好的地面仿形性能,集拢铺条装置可通过调节获得合适的作业宽度,保证草条宽度和形状均匀
上海世达尔 9GYQ-3.0 型旋转式割草机		牵引式,配套功率 67 kW 以上,割幅可达 3 m,刀盘单元配备坚固耐用的齿轮系统,采用紧密咬合的双压扁辊,压扁草条宽度 1.0 ~ 1.6 m
新疆中收农牧机械有限公司 92GZX-2.5 型割草机		采用后侧悬挂,以动力输出轴带动作业;配套功率 40.4 ~ 47.8 kW,割幅 2.5 m,旋转式切割器,生产率 2 ~ 2.3 hm ² /h;采用下传动,能紧贴地面切割,割茬低;对地表具有良好的仿型能力;强制分禾,不会产生牵挂堆堵等现象

(2) 搂草机

搂草机主要作用是将割后散铺于田间的牧草聚拢成草条,加快牧草在田间的干燥,以方便打捆机后续收集草条^[113]。刈割后的燕麦草用搂草机经摊行、翻草、搂草、翻条、摊条和并条等环节进行干燥调制。目前国内外使用的捡拾集草装备主要有指盘式搂草机和水平旋转搂草机,横向搂草机和滚筒式侧向搂草机已逐步退出市场^[114]。国外机型种类较多,呈系列化,自动化水平高,传动系统、电液控制系统技术成熟,主要生产厂家有 Kuhn、Sip、Claas、John Deere、New Holland 和 Enorossi 等公司^[115]。国内的搂草机存在技术水平低,产品质量较差,使用故障多、可靠性差,产品品种不全,保有量低等问题^[116]。

我国学者对燕麦青干草的制备工艺、营养品质及饲喂效果研究较多,对燕麦摊搂机械研究较少。生产中,燕麦的摊晒环节主要借用苜蓿搂草机或引进国外牧草搂草机。国内外常见的搂草机如表 10 所示。

(3) 打捆机

打捆机可将经摊晒集条的燕麦青干草捡拾打捆成为成型的草产品,来满足牲畜的饲喂和运输贮藏要求,提高草产品的商品性。打捆机既可用在青干草的打捆作业过程,也可用在青贮饲料收获环节。常见的燕麦青干草打捆机根据草捆的成型形状,可分为圆草打捆机和方草捆打捆机。

方草捆打捆机的部件包括捡拾装置、输送喂入装置、活塞和压捆室、打捆装置、草捆长度控制装置、密度调整装置、传动机构和牵引装置^[117]。其可一次完成牧草的捡拾、喂入、压缩成型、打结和卸料等工序。方草捆打捆机根据动力来源可分为牵引式方草捆打捆机和自走式方草捆打捆机,应用较多的是牵引式方草捆打捆机。国外方草捆打捆机的研发历史悠久,积累了丰富的生产和制造经验,生产的方草捆打捆机技术先进质量可靠,在国内有一定的保有量,具有代表性的生产厂家有 Agco、John Deere、Class、Krone、New Holland 等公司^[118]。

我国学者也对方草捆打捆机关键技术开展了大量研究。王锋德等^[119]结合玉米秸秆的打捆压缩特性和直燃发电对秸秆燃料规则捆型上料系统的要求设计了 4YF-1300 型大方捆打捆机。杨莉等^[120]设计了自带传动动力恒频方草捆捡拾压捆机,其成捆率达到了 99.1%,规则草捆率为 98%,草捆密度达到了 130 ~ 230 kg/m³,可对牧草、农作物秸秆进行捡拾、压缩和打捆联合作业。尹建军等^[121]设计了一种弹簧力平衡式方捆机捡拾器高度自动仿形装置,仿形误差可以控制在 -4 ~ 18 mm。雷昌毅等^[122]为满足压捆机构的理想运动特性要求,提出了一种非圆齿轮-曲柄滑块式新型压捆机构。苏刚等^[123]研究了逆向工程在方草捆打捆机打结器设计中的应用。李慧等^[124-127]对 D 型打结器进行了深入研究。

表 10 国内外的搂草机
Tab.10 Examples of hayrakes

机具型号	实物图	主要特点
约翰迪尔 WR10 系列搂草机		指盘式搂草机,有 8、10 和 12 轮 3 种型号,便于运输和存放,运行平稳,田间调整方便快捷,可选装中心搂草轮。
格兰 9471S 型侧向搂草机		牵引杆式,配套功率 51.5 kW 以上,工作幅宽 6.6 ~ 7.1 m,草铺宽度 0.9 ~ 1.4 m;采用 4 轮支撑地盘,地面仿形能力强,搂草效果好
库恩 GA 系列搂草机		水平旋转式搂草机,配套功率 30 kW 以上,工作宽度范围可达 9.30 m,地面仿形能力强,转盘高度轻松调节,转盘可相互独立升降,且其升降角度可调
伊诺罗斯 BATRAKE - 12 型指盘式搂草机		配套功率 22 kW 以上,工作宽度 7.40 m,草盘数 12 个,齿条数 40/轮,齿条直径 7 mm,齿条耐磨性和抗断裂性好,搂草轮独立仿形
华德 9LQZ - 8.5 型牵引折叠式指盘搂草机		配套功率 44 kW 以上,可自动调整搂草幅宽,左右两侧指盘可实现自动升降,最大工作幅宽 8.5 m;通过单独调整每个指盘,实现柔性仿形技术;通过调节草条宽度调节器,可获得不同草条宽度,以适应后续不同幅宽收获作业
优牧达 5162 型水平旋转搂草机		配套功率 30 kW 以上,动力输出轴转速 540 r/min,搂齿在作业时动作轻柔,单接盘作业宽度 3.4 ~ 6.2 m;平行四边形框架结构的后转子上安装了枢轴,地面仿形效果好
沃得 9LZ - 6.35 型搂草机		配套功率 36.8 kW 以上,工作幅宽 5.27 ~ 6.35 m,齿盘数量 10 只,每个齿盘搂齿数量 40 只,齿盘直径 1.45 m,调整搂草轮臂可改变堆草的宽度,搂草漏草率 0 ~ 2%

孙贵斌等^[128-130]集成了 D 型打结器及食品包装打卡机结构和工作原理的特点,设计了机械和气动卡扣式方草捆打结器。郭辉等^[131]为解决目前轮式自走方捆打捆机行走速度自动控制问题,设计了一种基于工作负荷反馈的行走速度控制系统。张安琪等^[132-133]为实现小型方捆机草捆动态称量系统的准确测量,基于多传感器融合技术设计了一套方捆机草捆动态称量系统。国内外常见的方草捆打捆机见表 11。

6.1.3 燕麦秸秆机械化收获技术与装备

燕麦秸秆一般是指收获脱粒后的干秸秆,裸燕麦秸秆蛋白质、脂肪、可消化纤维含量高于小麦、大麦、黑麦、谷子和玉米,而难以消化的粗纤维较少。裸燕麦秸秆中含粗蛋白 5.2%、粗脂肪 2.2%、无氮浸出物 44.6%,均比谷草、麦草、玉米秸秆高;难以消化的纤维质量分数 28.2%,比小麦、玉米、粟秸低 4.9% ~ 16.4%,是优质饲草之一^[43]。燕麦秸秆在牧草短缺地区或短缺季节可作为一种补充饲料。燕麦秸秆的机械化收获主要是在燕麦籽粒收获后,进

行捡拾打捆再贮藏。

6.2 燕麦籽粒机械化收获技术与装备

燕麦的籽粒收获主要是指对裸燕麦的收获。我国对燕麦籽粒收获机械研究较少,目前没有专用燕麦籽粒收获机,多借用稻麦谷物联合收获机进行燕麦籽粒收获,实际生产中存在喂入量不匹配、割台损失大、不适合山地作业等问题。

国内用于燕麦收获的主要机型有久保田 4LZ - 2.5 (PRO688Q) 型全喂入履带收割机 (图 10a)、沃得锐龙 4LZ - 6.0MD (Q) 型履带自走全喂入式联合收割机 (图 10b)、雷沃谷神 RG60 (4LZ - 6G3) 型谷物联合收割机 (图 10c)、中联谷王 TB80B (4LZ - 8B1) 型谷物收割机 (图 10d)、中机南方碧浪 4LZ - 4.0Z 型履带式全喂入联合收割机 (图 10e) 等。

由于收获燕麦时,存在植株成熟度不一致、低成熟度籽粒脱皮难、茎秆韧性强、脱出物清选难的问题,直接采用上述机型进行燕麦联合收获时,难以达到良好的作业效果,可通过调整脱粒装置和清选装置的工作参数来适应燕麦收获。一般而言,在较适

表 11 国内外的方草捆打捆机
Tab. 11 Examples of square balers

机具型号	实物图	主要特点
纽荷兰 BIGBALER870 型大方捆打捆机		配套功率 95.58 kW 以上, 捡拾宽度 196.8 cm, 草捆截面尺寸 70 cm × 80 cm; 预压室和重型压实器, 使草捆密度更大; 安装的转子式切刀切割效果更好; 齿轮传动的加强型双结打结器具有报警功能, 可靠性更高
约翰迪尔 L341 大型方捆机		配套功率 106.6 kW 以上, 打捆尺寸 120 cm × 90 cm, 草捆长度 60 ~ 300 cm, 捡拾宽度 2.2 m 或 2.5 m, 配备高强度捡拾弹齿, 捡拾喂入顺畅, 高效可靠
爱科麦赛福格森 MF 1844N 型小方捆打捆机		配套功率 58.8 kW 以上, 液压密度控制系统确保草捆密度保持均匀一致, 打捆尺寸 40 cm × 56 cm, 草捆长度 305 ~ 1 321 cm 可调; 中置式捡拾喂入输送, 喂入量大、捡拾干净, 捡拾宽度 190 cm
华德 9YFQ-2.2 型跨行式方草捆捡拾压捆机		配套功率 34.56 kW 以上, 捡拾宽度 224 cm, 打捆尺寸 36 cm × 46 cm, 草捆长度 300 ~ 1 300 mm, 草捆密度 110 ~ 180 kg/m ³ , 成捆率 98% 以上
中农机 9YDF-90 型大方捆打捆机		配套功率 132.35 kW 以上, 打捆尺寸 120 cm × 90 cm, 草捆长度 260 cm, 捡拾宽度 240 cm, 具有紧密的弹齿间距、弧线形弹齿护板、盘型条铺护板和充气仿行轮, 可靠的双结打结系统, 打结器传动设计为齿轮传动
沃得 9YFQ-1960 型方草捆打捆机		配套功率 35.3 kW 以上, 打捆尺寸 45 cm × 36 cm, 草捆长度 30.5 ~ 132 cm, 捡拾宽度 196 cm, 采用 D 型小方捆打结器, 机械式草捆密度调节装置, 草捆装卸方便



图 10 我国典型的燕麦籽粒收获机
Fig. 10 Examples oat combine harvesters in China

宜收获的植株含水率下, 可将脱粒装置的脱粒间隙调整为 (10 ± 2) mm, 脱粒滚筒转速调整为 1 000 r/min, 清选风机转速调整为 1 100 r/min。对不同茎秆含水率、不同作业速度、不同燕麦品种等作业条件下的燕麦收获, 也需根据实际作业情况及时进行作业参数调整, 以保证收获质量。

近年来, 国内学者对燕麦秸秆和籽粒的生物力学特性、收获技术及关键部件、清选特性等开展研究, 取得了一定进展。

赵楠等^[134-137]先后对燕麦茎秆、燕麦籽粒韧性机械力学特性及相关的理化性质进行了研究, 表明燕麦秸秆具有黏弹特性, 含水率显著影响其剪切和压缩力学参数; 燕麦籽粒本身具有韧性强、耐揉搓、抗挤压且不易损伤的优点, 为燕麦收获装备的研制提供一定依据。

马玉哲^[138]针对裸燕麦收获机械单一、收获机械与作物不配套等问题, 研制了单轴流钉齿式裸燕麦脱粒与分离试验台, 通过测试裸燕麦穗头连接力

确定了适宜收获含水率, 采用高速摄像技术和无线动态监测技术与试验相结合, 对裸燕麦单轴流脱粒与分离装置性能进行了试验。赵瑞男^[139-140]针对裸燕麦机械收获存在杂余含量高、未脱净损失率大等问题, 通过对全钉齿式、纹杆-钉齿式、全纹杆式 3 种脱分滚筒形式对比研究, 认为全钉齿式脱分滚筒总体上性能要比全纹杆式、纹杆-钉齿式滚筒更适合裸燕麦脱粒, 进而对裸燕麦全钉齿式轴流脱粒与分离装置进行了性能试验。孙成龙等^[141]针对我国燕麦机械化收获时杂余含量高和未脱净严重的问题, 在分析了现有谷物收获机脱粒装置结构的基础上, 设计了一种燕麦脱粒组合式轴流滚筒, 在实验室搭建了燕麦脱粒试验台, 并进行了脱粒性能试验, 结果表明, 在喂入量为 1.46 kg/s, 主滚筒转速、脱粒间隙分别为 1 059 r/min、12 mm 时, 含杂率和未脱净率均最低, 分别为 19.39%、0.72%。

耿令新等^[142]针对燕麦收获期同一植株上籽粒成熟度不一致、低成熟度的籽粒脱皮难、带皮(壳)

籽粒较多导致杂余含量高,影响收获质量以及后续加工的难题,提出一种先揉搓后清选的燕麦籽粒除杂方案,设计出一种燕麦籽粒揉搓式除杂装置,试验结果清洁率达 99.23%,损失率为 1.53%。侯华铭等^[143]对燕麦作物脱出物各成分悬浮速度进行测定,燕麦脱出物籽粒、种皮、分枝、茎秆、叶子、未脱皮籽的悬浮速度分别是:4.35 ~ 11.01 m/s、0.62 ~ 1.71 m/s、1.62 ~ 4.52 m/s、1.14 ~ 6.28 m/s、0.91 ~ 3.56 m/s、3.24 ~ 9.48 m/s。结果表明无论采用风选、筛选或风筛选结合清选都不能很好地将带皮籽粒分离出来,导致最终收获的燕麦籽粒中含有大量的带皮籽粒,为燕麦收获机清选装置的设计提供参考。李心平等^[144]为了解决燕麦清选装置清选性能低的问题,根据燕麦的物理特性对单风机三圆筒筛清选装置进行了结构改进,设计了一种燕麦弧形栅格筛复清选式圆筒筛清选装置,田间验证试验结果表明,在最优参数下,含杂率为 1.97%,损失率为 2.68%。

7 我国燕麦生产全程机械化技术分析

7.1 发展现状分析

(1) 燕麦机械化技术与装备研究起步晚

我国 2008—2010 年启动国家燕麦产业技术体系建设专项,2011 年成立燕麦荞麦产业技术体系,“十三五”期间增设播种机械化和收获机械化岗位。燕麦属于小宗作物,相比其他的主要粮食作物,燕麦机械化技术与装备研究处于起步阶段,研究基础薄弱。

(2) 燕麦成熟适用机型缺乏

我国燕麦生产各个环节所用机械大多是借用稻麦生产机械或经改进而来,燕麦自身的物理机械特性使得借用机具在使用过程中存在工作参数不匹配、生产适应性差、作业质量不高、收获损失大等问题,成熟适用机型缺乏。

(3) 燕麦生产各环节机械化水平发展不均衡

我国燕麦生产在育种、大田播种、田间管理、籽粒收获、产品加工等环节的机械装备相对短缺,机械化水平较低,特别是育种、田间管理、产品加工环节相对薄弱。在饲草机械化收获环节,可借用其他牧草收获机械,通用性相对较好,机械化程度相对较高。

(4) 适于丘陵山区作业的小型机具缺乏

燕麦主产区一大部分为丘陵山区,地块面积小,机耕道窄,大中型机械很难开展各项作业,很大一部分地区仍然沿用了传统的人工劳作方式,劳动强度大,机械化水平低。

(5) 燕麦从业人员对新技术接受能力差,导致新技术推广缓慢

燕麦主产区燕麦从业人员过于依赖传统作业方式,对新技术新工艺新机具接受能力差,导致新技术新工艺新机具推广进程缓慢。

(6) 燕麦产品经济效益不高,制约了机械化生产技术的发展

燕麦作为小宗作物,虽然燕麦营养价值高,但燕麦产品品种单一,高附加值的深加工产品少,导致燕麦产品整体经济效益不高,不论在种植规模和机械投入都受到消极影响,从而制约了机械化生产技术的发展。

7.2 发展趋势

针对我国燕麦全程机械化生产的实际问题,提出未来燕麦机械化生产技术的发展趋势:

(1) 加强基础研究,夯实理论基础

开展土壤-燕麦-机器相互作用关系机制研究,实现燕麦生产机械的高效低损作业,开展机具及关键部件的适应性和可靠性研究,提高作业效率和质量。开展燕麦耕作栽培模式与机械作业的适应性,茎秆、籽粒与机械耦合机理及生物力学特性,机械收获方式对产品品质的影响等方面研究,为燕麦机械化播种及收获装备的研发和技术推广提供基础支撑。开展燕麦饲草保鲜、发酵、贮藏、饲养效果、营养成分等方面研究,为燕麦饲草机械化生产装备研发提供理论支撑。

(2) 开展适于燕麦生产的多样化技术与装备研究,重点突破燕麦生产机械化的薄弱环节

针对燕麦种子培育环节机械缺乏的生产实际,根据小区育种机械化种植及收获要求和作业特点,开展燕麦小区播种机和小区收获机的研制;针对燕麦种子特性和各种种植区域的生产要求,开展燕麦精量排种、覆土镇压、播深控制等技术与装置研究,集成研制燕麦精密播种机;针对前茬作物秸秆特性,研究秸秆切断机理,开展免耕条件下开沟器防堵技术研究,研制免耕播种机;针对绿色有机燕麦种植,探索机械化高产绿色栽培模式及配套中耕除草装备研发;开展轻简化的田间管理机具研发;针对丘陵山区机械化水平低的问题,开展丘陵山区收获机通用底盘、工作装置姿态调控系统、检测和控制系统的研发,集成研发适于丘陵山区作业的系列产品,提高丘陵山区燕麦生产机械化水平。

(3) 加强燕麦体系的协同作用,加大新技术推广力度

国家燕麦荞麦产业技术体系全国共有岗位科学家 22 名,涉及育种、栽培、植保、产品加工、机械、产

业经济等产业链条中各环节,在各自领域内有丰富的研究经验和较为成熟的研究成果;全国共有 18 个综合试验站,遍布我国燕麦主产区。应加强体系各岗位科学家和综合试验站的协同作用,将燕麦生产过程中先进的新机具新技术新工艺进行推广示范应用,加强职业农民培训,转变传统观念,摒弃落后的生产管理方式,促进燕麦产业提质增效与升级。

(4)加快标准制定,促进燕麦产业标准化、产业化

针对不同生产区域的作业要求,开展机械产品技术条件、机械化作业技术规范和质量标准的制定工作,为促进燕麦机械化、规范化、标准化和产业化生产提供技术支撑。

(5)提高燕麦产业的经济效益,助推机械化进程

开展燕麦多元化产品、高附加值产品、功能性产品的技术研发,加强燕麦保健功能宣传,扩大优质燕麦饲草种植及加工面积,提高燕麦产业的经济效益,助推机械化发展进程。

(6)开展燕麦生产机械的自动化和智能化研究
针对燕麦生产机械智能化程度低的问题,基于人工智能、北斗导航、卫星遥感、农业大数据、智能制造等先进技术和理念,集成开发燕麦智能育种机械、智能播种机、智能收获机等,建立燕麦病虫害监测与防控治理体系,提高机具的作业质量和作业效率,促进燕麦生产机械向智能化方向发展。

参 考 文 献

- [1] 任长忠,胡跃高. 中国燕麦学[M]. 北京:中国农业出版社,2013.
- [2] 李刚,李荫藩,王慧,等. 早熟莜麦新品种晋燕 20 号的选育与栽培技术[J]. 山西农业科学,2017,45(11):1780-1781,1785.
- LI Gang, LI Yinfan, WANG Hui, et al. Breeding and cultivation techniques of early naked oats variety Jinyan 20[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2017, 45(11):1780-1781, 1785. (in Chinese)
- [3] 张向前,刘景辉,齐冰洁,等. 燕麦种质资源主要农艺性状的遗传多样性分析[J]. 植物遗传资源学报,2010,11(2):168-174.
- ZHANG Xiangqian, LIU Jinghui, QI Bingjie, et al. Cluster diversity analysis of the main agronomic traits in oat germplasm[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2010, 11(2):168-174. (in Chinese)
- [4] 张鸣凡,陈志伟,贾举庆,等. 燕麦籽粒皮裸性相关 AP2/ERF 转录因子基因的克隆[J]. 山西农业科学,2020,48(5):658-663.
- ZHANG Mingfan, CHEN Zhiwei, JIA Juqing, et al. Cloning of AP2/ERF transcription factor gene related to oat kernel covering [J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2020, 48(5):658-663. (in Chinese)
- [5] MARSHALL A, COWAN S, EDWARDS S, et al. Crops that feed the world 9. oats—a cereal crop for human and livestock feed with industrial applications[J]. Food Security,2013,5(1):13-33.
- [6] 胡新中,任长忠. 中国燕麦荞麦产业“十三五”发展报告(2016—2020)[M]. 西安:陕西科学技术出版社,2021.
- [7] 颜红海. 燕麦属物种间亲缘关系研究及栽培燕麦皮裸性状全基因组关联分析[D]. 成都:四川农业大学,2017.
- YAN Honghai. Genomic relationships of avena species and genome-wide association study for hullessness in oat using genotyping sequencing (GBS)[D]. Chengdu:Sichuan Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [8] 任长忠,崔林,何峰,等. 我国燕麦荞麦产业技术体系建设与发展[J]. 吉林农业大学学报,2018,40(4):524-532.
- REN Changzhong, CUI Lin, HE Feng, et al. Construction and development of China oat and buckwheat industrial technology system[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2018, 40(4):524-532. (in Chinese)
- [9] 中国农学会遗传资源学会. 中国作物遗传资源[M]. 北京:中国农业出版社,1994:198-200.
- [10] 郑殿升,张宗文. 大粒裸燕麦(莜麦)(*Avena nuda* L.)起源及分类问题的探讨[J]. 植物遗传资源学报,2011,12(5):667-670.
- ZHENG Diansheng, ZHANG Zongwen. Discussion on the origin and taxonomy of naked oat (*Avena nuda* L.) [J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2011, 12(5):667-670. (in Chinese)
- [11] 赵桂琴,师尚礼. 青藏高原饲用燕麦研究与生产现状、存在问题与对策[J]. 草业科学,2004(11):17-21.
- ZHAO Guiqin, SHI Shangli. The current situation of oat research and production, problems and strategy in Tibetan Plateau [J]. Pratacultural Science, 2004(11):17-21. (in Chinese)
- [12] 周磊,王璐,赵宝平,等. 北方农牧交错区不同播期和刈割期对燕麦饲草产量和品质的影响[J]. 草地学报,2021,29(10):2355-2363.
- ZHOU Lei, WANG Lu, ZHAO Baoping, et al. Effect of different sowing date and cutting time on yield and quality of forage oat in agro-pastoral ecotone of northern China[J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(10):2355-2363. (in Chinese)
- [13] 侯龙鱼,朱泽义,杨杰,等. 我国饲草用燕麦现状、问题和潜力[J]. 西南民族大学学报(自然科学版),2019,45(3):248-253.
- HOU Longyu, ZHU Zeyi, YANG Jie, et al. Current status, problems and potentials of forage oat in China[J]. Journal of Southwest University for Nationalities(Natrual Science Edition), 2019, 45(3):248-253. (in Chinese)
- [14] 杨春,王国刚,王明利. 我国的燕麦草生产和贸易[J]. 草业科学,2017,34(5):1129-1135.
- YANG Chun, WANG Guogang, WANG Mingli. Production and trade of wild oat forage in China[J]. Pratacultural Science, 2017, 34(5):1129-1135. (in Chinese)

- [15] 刘文辉,贾志锋,梁国玲. 我国饲用燕麦产业发展现状及存在的问题和建议[J]. 青海科技, 2020, 27(3): 82–85.
- [16] 苏日娜. 中国燕麦产业发展研究——以内蒙古为例[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2013.
SU Rina. Study on the development of oat industry in China—evidence of Inner Mongolia[D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- [17] 刘曙光,尚书旗,杨然兵,等. 小区播种机的发展分析[J]. 农机化研究, 2011, 33(3): 237–241.
LIU Shuguang, SHANG Shuqi, YANG Ranbing, et al. Analysis of plot seeder development[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(3): 237–241. (in Chinese)
- [18] 朱明星. 一种新型小区小麦精密播种装置的设计与试验[D]. 南京:南京农业大学, 2014.
ZHU Mingxing. Design and testing on a new precision device for wheat experimental sowing[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- [19] 杨薇,王飞,赫志飞,等. 小区育种机械发展现状及展望[J]. 农业工程, 2014, 4(6): 7–9, 56.
YANG Wei, WANG Fei, HE Zhifei, et al. Development present situation and prospect of plot breeding machinery[J]. Agricultural Engineering, 2014, 4(6): 7–9, 56. (in Chinese)
- [20] 陶鑫,徐祝欣,李建东,等. 小麦田间育种机械化研究现状及应用[J]. 农业工程, 2013, 3(4): 12–15.
TAO Xin, XU Zhuxin, LI Jiandong, et al. Research situation and application of wheat breeding field experiments mechanization[J]. Agricultural Engineering, 2013, 3(4): 12–15. (in Chinese)
- [21] 周家鹏. 小区玉米单粒精密点播机的设计与试验研究[D]. 青岛:青岛农业大学, 2016.
ZHOU Jiapeng. Design and test of corn grain precision jukeboxes[D]. Qingdao: Qingdao Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [22] 卢秉福,胡志超,张祖立. 作物育种试验区机械化的研究进展[J]. 中国农机化, 2006(6): 44–47.
LU Bingfu, HU Zhichao, ZHANG Zuli. Review on mechanization of crop breeding test plot[J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2006(6): 44–47. (in Chinese)
- [23] 赵宇. 2BXJ-6型大豆垄三栽培育种精量播种机的研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2013.
ZHAO Yu. Study on 2BXJ-6 precision spaced planter with soybean ridge-three technique[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- [24] 尚书旗,吴秀丰,杨然兵,等. 小区育种播种装备与技术研究现状及展望[J]. 农业机械学报, 2021, 52(2): 1–20.
SHANG Shuqi, WU Xiufeng, YANG Ranbing, et al. Research status and prospect of plot-sowing equipment and technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(2): 1–20. (in Chinese)
- [25] LIANG Z W, LI Y M, XU L Z, et al. Sensor for monitoring rice grain sieve losses in combine harvesters[J]. Biosystems Engineering, 2016, 147: 51–66.
- [26] 邢高勇. 小区谷物联合收获机的智能调控系统研究[D]. 镇江:江苏大学, 2019.
XING Gaoyong. Research on intelligent control system of plot grain combine harvester[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019. (in Chinese)
- [27] 孙钦华,李国莹,王勇,等. 稻麦繁育收获机研究现状及展望[J]. 农业工程, 2020, 10(3): 7–11.
SUN Qinhua, LI Guoying, WANG Yong, et al. Research situation and prospect of rice and wheat breeding harvesters[J]. Agricultural Engineering, 2020, 10(3): 7–11. (in Chinese)
- [28] 邢高勇,毛罕平,王佳慧,等. 小区谷物联合收获机作业速度智能调控算法设计与仿真[J]. 农机化研究, 2020, 42(11): 45–50.
XING Gaoyong, MAO Hanping, WANG Jiahui, et al. Design of intelligent control algorithm for working speed of plot grain combine harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(11): 45–50. (in Chinese)
- [29] 戴飞,赵武云,韩正晟,等. 4GX-100型小区小麦种子收获机改进设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊): 196–202.
DAI Fei, ZHAO Wuyun, HAN Zhengsheng, et al. Improvement and experiment on 4GX-100 type wheat harvester for breeding plots[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 196–202. (in Chinese)
- [30] 戴飞,张锋伟,高爱民,等. 4GX-100型小区小麦种子联合收获机关键作业参数优化[J]. 农业工程学报, 2012, 28(26): 53–58.
DAI Fei, ZHANG Fengwei, GAO Aimin, et al. Optimization of key operating parameters in 4GX-100 type cropland plot wheat seed combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(26): 53–58. (in Chinese)
- [31] 高爱民,戴飞,孙伟,等. 小区小麦育种收获机锥型脱粒滚筒性能试验[J]. 农业工程学报, 2011, 27(10): 22–26.
GAO Aimin, DAI Fei, SUN Wei, et al. Experiment on conical threshing cylinder performance of plot wheat breeding seed combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(10): 22–26. (in Chinese)
- [32] 赵丽清,尚书旗,王延耀,等. 基于小区育种的收获机智能测产系统[J]. 农业工程学报, 2012, 28(26): 172–178.
ZHAO Liqing, SHANG Shuqi, WANG Yanyao, et al. Intelligent yield monitoring system of harvester based on plot breeding[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(26): 172–178. (in Chinese)
- [33] 王家胜,王东伟,尚书旗,等. 4LZZ-1.0型小区稻麦联合收割机的研制及试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(18): 19–25.
WANG Jiaosheng, WANG Dongwei, SHANG Shuqi, et al. Development and experiment on 4LZZ-1.0 type plot grain combine[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(18): 19–25. (in Chinese)
- [34] 李毅念,易应武,杜世伟,等. 小区谷物联合收获机气吹式割台设计与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(6): 79–87.
LI Yinian, YI Yingwu, DU Shiwei, et al. Design and experiment on air blowing header of plot combine harvester for grain[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 79–87. (in Chinese)

[35] 陆荣,刘志侠,高连兴,等. 立锥式小区花生脱壳机气吸清选装置研制[J]. 农业工程学报,2020,36(21):23-30.
LU Rong, LIU Zhixia, GAO Lianxing, et al. Development of air suction cleaning device of vertical conical peanut sheller for plot planting[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(21): 23-30. (in Chinese)

[36] 2BXF-6 小麦分施肥播种机[EB/OL]. [2022-06-01]. https://www.nongjitong.com/product/hbnonghaha_2bxf-6_seeder.html.

[37] 山西省农业科学院高寒区作物研究所. 一种燕麦播种机:CN201420262602.X[P]. 2014-11-12.

[38] 山西省农业科学院右玉农业试验站. 一种燕麦播种机:CN201620318413.9[P]. 2016-09-21.

[39] 赤峰市农牧科学研究院. 宽幅条播燕麦播种机:CN201620689042.5[P]. 2016-11-30.

[40] 刘瑞,李衍军,刘春晓,等. 铲式宽苗带燕麦播种开沟器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(9): 89-96.
LIU Rui, LI Yanjun, LIU Chunxiao, et al. Design and experiment of shovel type wide seedling belt oat seeding furrow opener [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9): 89-96. (in Chinese)

[41] 杨富,李刚,施毅,等. 燕麦全程机械化配套栽培技术[J]. 农业科技通讯, 2020(10): 259-261.

[42] 李生荣. 燕麦青贮饲草的制作技术[J]. 草业与畜牧, 2008(5): 55.

[43] 皇甫红芳,李刚,苏占明. 燕麦饲草饲料加工种类及现状[J]. 种业导刊, 2020(5): 19-22.

[44] 李志强,冯富. 燕麦青贮研究进展[J]. 西南民族大学学报(自然科学版), 2018, 44(1): 1-5.
LI Zhiqiang, FENG Fu. Research progress of oat silage[J]. Journal of Southwest University for Nationalities(Natural Science Edition), 2018, 44(1): 1-5. (in Chinese)

[45] 陆永祥,成启明,陈良寅,等. 不同海拔的燕麦青贮饲料发酵品质和细菌群落特征[J]. 草地学报, 2020, 28(2): 350-357.
LU Yongxiang, CHENG Qiming, CHEN Liangyin, et al. Fermentation quality and bacterial community characteristics of oat silage at different altitudes[J]. Acta Agrestia Sinica, 2020, 28(2): 350-357. (in Chinese)

[46] 王杰,王伟,徐成体. 高寒地区燕麦青贮技术进展[J]. 青海畜牧兽医杂志, 2020, 50(6): 52-56.

[47] 王德成,贺长彬,武红剑,等. 苜蓿生产全程机械化技术研究现状与发展分析[J]. 农业机械学报, 2017, 48(8): 1-25.
WANG Decheng, HE Changbin, WU Hongjian, et al. Review of alfalfa full-mechanized production technology [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(8):1-25. (in Chinese)

[48] 王泽群. 青饲料收获机现状和发展趋势[J]. 农机市场, 2020(9): 23-24.

[49] 张科星,王昕伟,贾晶霞. 国内外青贮饲料收获机械发展概况与趋势[J]. 农业机械, 2009(10): 33-34.

[50] 刘海涛,胡军,韩春雨. 袋装青贮技术在我国推广与应用[J]. 农机化研究, 2005,27(6): 208-209, 212.
LIU Haitao, HU Jun, HAN Chunyu. The spreading and application of the packing and ensiling technology in China [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2005,27(6): 208-209, 212. (in Chinese)

[51] 龙凤芹. 如何制作袋装青贮饲料[J]. 中国畜禽种业, 2019, 15(12): 40.

[52] 国家牧草产业技术体系. 牧草产业技术研究综述[M]. 北京:中国农业出版社, 2013.

[53] 郭文刚. 玉米秸秆袋装青贮技术探究[J]. 中国动物保健, 2017, 19(12): 21-22.

[54] ASHBELL G, KIPNIS T, TITTERTON M, et al. Examination of a technology for silage making in plastic bags[J]. Animal Feed Science and Technology, 2001, 91(3): 213-222.

[55] 李琦. 饲料袋装青贮技术的推广与应用[J]. 中国畜牧兽医文摘, 2016, 32(1): 230.

[56] 杜军国,季彬,祁宏山,等. 甜高粱茎秆袋装青贮研究[J]. 中国酿造, 2018, 37(5): 146-149.
DU Junguo, JI Bin, QI Hongshan, et al. Silaging of sweet sorghum straw in bags[J]. China Brewing, 2018, 37(5): 146-149. (in Chinese)

[57] 魏光华. 玉米秸秆袋装青贮技术要点[J]. 中国牛业科学, 2020, 46(6): 68.

[58] 姜守明. 9LT-50 型青贮饲料袋式灌装机[J]. 农业知识, 2004(18):15.

[59] 王亚波,王金平,胡景媛. 秸秆袋贮加工工艺及关键设备的研制[J]. 新疆农机化, 2004(6): 46-47.

[60] 郑泽颖,张艳红,李小龙. 青贮灌装平台的研制[J]. 北京农业, 2011(6): 233-235.
ZHENG Zeyang, ZHANG Yanhong, LI Xiaolong. Development of silage silo loading platform[J]. Beijing Agriculture, 2011(6): 233-235. (in Chinese)

[61] 万其号,王德成,王光辉,等. 自走式牧草青贮联合装袋机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(19): 30-37.
WAN Qihao, WANG Decheng, WANG Guanghui, et al. Design and experiment of self-propelled grass silage combined bagging machine[J]. Transactions of the CSAE, 2014,30(19): 30-37. (in Chinese)

[62] 内蒙古自治区农牧业机械技术推广站. 一种高密度袋式青贮灌装机:CN202021493630.4[P]. 2021-03-16.

[63] 郭辉,徐志强,吕全贵,等. 棉花秸秆螺旋压缩装袋机设计及试验[J]. 农业工程, 2018, 8(6): 103-108.
GUO Hui, XU Zhiqiang, LÜ Quanguai, et al. Design and test of cotton straw spiral compression bagging machine [J]. Agricultural Engineering, 2018, 8(6): 103-108. (in Chinese)

[64] 徐志强,郭辉,陈恒峰,等. 棉花秸秆螺旋压缩输送装袋机的设计[J]. 农业科技与装备, 2017(11): 42-44.
XU Zhiqiang, GUO Hui, CHEN Hengfeng, et al. The design of cotton straw spiral compression conveying and bagging machine [J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2017(11): 42-44. (in Chinese)

[65] 赵云汉,庞博,周立洋,等. 基于 PLC 的青贮料装袋机控制系统设计与研究[J]. 农机化研究, 2018, 40(12): 70-74.
ZHAO Yunhan, PANG Bo, ZHOU Liyang, et al. The research and design of silage bagging machine control system based on PLC[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(12): 70-74. (in Chinese)

[66] 董妍,常蕊. 圆捆缠膜机械国内外研究概况[J]. 农业工程, 2016, 6(1): 19-21.
DONG Yan, CHANG Rui. Development situation of round bale wrapping machine at home and abroad [J]. Agricultural Engineering, 2016, 6(1): 19-21. (in Chinese)

[67] 梁欢,左福元,袁扬,等. 拉伸膜裹包青贮技术研究进展[J]. 草地学报, 2014, 22(1): 16-21.

- LIANG Huan, ZUO Fuyuan, YUAN Yang, et al. Research progress of round bale silage technology[J]. Acta Agrestia Sinica, 2014, 22(1): 16–21. (in Chinese)
- [68] 李霞,张艳宜,王季,等. 燕麦草拉伸膜裹包青贮技术研究[C]//第十届(2015)中国牛业发展大会论文汇编, 2015: 251–254.
- [69] 潘继兰. 拉伸膜裹包青贮的优势与制作[J]. 农村养殖技术, 2012(23): 43.
- [70] 刚永和,张海博,杜江,等. 拉伸膜裹包青贮燕麦饲草冬季饲喂幼龄绵羊的效果[J]. 草业科学, 2019, 36(7): 1890–1896.
- GANG Yonghe, ZHANG Haibo, DU Jiang, et al. Analysis of stretched film-wrapped silage oat forage for feeding young sheep in winter[J]. Pratacultural Science, 2019, 36(7): 1890–1896. (in Chinese)
- [71] 王春光,马卫民,马赛,等. 钢辊预压式圆捆机设计[J]. 农业工程, 2011, 1(2): 7, 17–20.
- WANG Chunguang, MA Weimin, MA Sai, et al. Design on round baler with prepressing device[J]. Agricultural Engineering, 2011, 1(2): 7, 17–20. (in Chinese)
- [72] 高东明,王德成,李杰,等. 青饲圆捆机对数螺旋式成形装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2015, 46(7): 118–122.
- GAO Dongming, WANG Decheng, LI Jie, et al. Design and test of logarithmic spiral round baler chamber[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 118–121. (in Chinese)
- [73] 高东明,李杰,王德成. 辊杠式圆捆机青贮打捆效率与功耗试验[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2017, 38(4): 428–433.
- GAO Dongming, LI Jie, WANG Decheng. Experiment on silage baling efficiency and power consumption of chain-crossbar round baler[J]. Journal of Jiangsu University(Natural Science Edition), 2017, 38(4): 428–433. (in Chinese)
- [74] 刘晓,侯加林,李文,等. 青贮圆捆包膜机的设计[J]. 中国农机化学报, 2017, 38(8): 34–38.
- LIU Xiao, HOU Jialin, LI Wen, et al. Design on round wrapping machine for silage[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2017, 38(8): 34–38. (in Chinese)
- [75] 尹建军,吴启斌,陈永河,等. 小型圆捆机捆草-卸捆自动操纵与报警装置研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(9): 96–101, 120.
- YIN Jianjun, WU Qibin, CHEN Yonghe, et al. Design of automatic manipulation and alarming device of straw-bundling and bale-unloading of minitype round baler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 96–101, 120. (in Chinese)
- [76] 刘家君,郭辉,吕全贵,等. 自走式圆捆机喂入量控制系统设计[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(7): 13–18, 25.
- LIU Jiajun, GUO Hui, LÜ Quanguai, et al. Design of feeding control system for self-propelled round baler[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(7): 13–18, 25. (in Chinese)
- [77] 李叶龙,王德福,王沫,等. 稻秆圆捆机辊盘式卷捆机构的设计及参数优化[J]. 农业工程学报, 2017, 33(6): 27–34.
- LI Yelong, WANG Defu, WANG Mo, et al. Design and parameters optimization of roll-disk baling mechanism for rice straw round baler[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(6): 27–34. (in Chinese)
- [78] 王德福,张全超,杨星,等. 秸秆圆捆机捆绳机构的参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(14): 55–61.
- WANG Defu, ZHANG Quanchao, YANG Xing, et al. Parameter optimization and experiment of rope-winding mechanism of straw round balers[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(14): 55–61. (in Chinese)
- [79] 李叶龙,王德福,李东红,等. 辊盘式圆捆机卷捆机理分析与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(12): 45–52.
- LI Yelong, WANG Defu, LI Donghong, et al. Theoretical analysis and experiment of baling mechanism of roll-disk round baler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(12): 45–52. (in Chinese)
- [80] 李叶龙,王德福. 钢辊式圆捆机卷捆功耗中关键生产信息的提取方法[J]. 沈阳农业大学学报, 2020, 51(5): 530–539.
- LI Yelong, WANG Defu. Extraction method of key production information in baling power consumption of steel-roller round baler[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2020, 51(5): 530–539. (in Chinese)
- [81] 李叶龙,王德福,雷军乐. 钢辊式圆捆机缠绳现象机理分析与机构改进[J]. 沈阳农业大学学报, 2017, 48(2): 182–190.
- LI Yelong, WANG Defu, LEI Junle. Mechanism analysis and structural improvement about roll phenomenon of steel-roll round balers[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2017, 48(2): 182–190. (in Chinese)
- [82] 李叶龙,王德福,雷军乐. 基于多场耦合理论的钢辊式圆捆机卷芯过程研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2019, 50(4): 429–437.
- LI Yelong, WANG Defu, LEI Junle. Baling analysis of the steel-roll round baler based on multi-field coupling theory[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2019, 50(4): 429–437. (in Chinese)
- [83] 雷军乐,王德福,李东红,等. 钢辊式圆捆机旋转草芯形成影响因素分析与优化[J]. 农业机械学报, 2015, 46(12): 18–25.
- LEI Junle, WANG Defu, LI Donghong, et al. Influence factors analysis and optimization of forming rotary straw core by steel-roll round baler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12): 18–25. (in Chinese)
- [84] 王德福,江志国,李百秋,等. 稻秆与圆捆机钢辊间滑动摩擦特性试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(21): 44–51.
- WANG Defu, JIANG Zhiguo, LI Baiqiu, et al. Experiment on sliding friction characteristics between rice straw and baler steel-roll[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(21): 44–51. (in Chinese)
- [85] 王德福,蒋亦元,王吉权. 钢辊式圆捆打捆机结构改进与试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(12): 84–88.
- WANG Defu, JIANG Yiyuan, WANG Jiquan. Structure-improving and experiment of steel-roll round baler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(12): 84–88. (in Chinese)
- [86] 华荣江,唐遵峰,叶红艳,等. 国内外圆捆机械研究与发展趋势[J]. 中国农机化, 2012(3): 23–26.
- HUA Rongjiang, TANG Zunfeng, YE Hongyan, et al. Research and development tendency about baler in domestic and overseas[J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2012(3): 23–26. (in Chinese)
- [87] 赵婉宁,操子夫,杨雨林,等. 玉米秸秆打捆机的研究现状及发展前景[J]. 农业与技术, 2014, 34(9): 39–40.
- [88] 杨莉. 国外圆捆机发展概况[J]. 农业工程, 2020, 10(1): 1–5.

- YANG Li. Development situation of round haler in foreign countries[J]. Agricultural Engineering, 2020, 10(1): 1–5. (in Chinese)
- [89] 杜木军, 沈从举, 周艳, 等. 圆捆打捆机应用现状与发展趋势[J]. 新疆农机化, 2020(1): 9–12.
DU Mujun, SHEN Congju, ZHOU Yan, et al. Application status and development trend of round baler[J]. Xinjiang Agricultural Mechanization, 2020(1): 9–12. (in Chinese)
- [90] 杨星. 转臂式圆草捆包膜机的设计与试验研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2016.
YANG Xing. Design and experimental of jib type coated machine for round bale[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [91] 苏佳佳, 翟改霞, 张平, 等. 圆草捆缠膜机设计与试验[J]. 农机化研究, 2020, 42(2): 106–111.
SU Jiajia, ZHAI Gaixia, ZHANG Ping, et al. Design and experiment of round bale wrapper machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(2): 106–111. (in Chinese)
- [92] 杜韧, 马秋生, 潘艳波, 等. 圆草捆缠膜机的设计与研究[J]. 华北航天工业学院学报, 2005(2): 1–2, 17.
DU Ren, MA Qiusheng, PAN Yanbo, et al. Design and research on the machine twining for plastic film round straw bundle cylinder[J]. Journal of North China Institute of Aerospace Engineering, 2005(2): 1–2, 17. (in Chinese)
- [93] 张将, 刁培松, 刁怀龙, 等. 自走式青贮打捆缠膜一体机设计与试验[J]. 农机化研究, 2017, 39(12): 73–77.
ZHANG Jiang, DIAO Peisong, DIAO Huailong, et al. Design and experiment on self-propelled silage baling tangle film machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(12): 73–77. (in Chinese)
- [94] 刘晓. 青饲料收获打捆包膜一体机关键装置的研制与试验[D]. 泰安: 山东农业大学, 2018.
LIU Xiao. Design and experiment of key device of single pass silage round wrapping machine[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [95] 张德学, 闵令强, 刘学峰, 等. 9YYB12 型青饲料打捆缠膜一体机的整机设计与研发[J]. 农机化研究, 2020, 42(2): 36–43.
ZHANG Dexue, MIN Lingqiang, LIU Xuefeng, et al. Design and development 9YYB12 type integrative machine for silage bundling and package wrapping[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(2): 36–43. (in Chinese)
- [96] 张德学, 任冬梅, 秦喜田, 等. 9YYB12 型青饲料打捆缠膜一体机落料回送总成的设计[J]. 农机化研究, 2019, 41(6): 53–59.
ZHANG Dexue, REN Dongmei, QIN Xitian, et al. Design of loopback assembly for the scattered materials of 9YYB12 type integrative machine for silage bundling and package wrapping[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(6): 53–59. (in Chinese)
- [97] 张成保, 孙宜田, 钟波, 等. 9YYB12 型青饲料打捆缠膜一体机智能控制流程研究[J]. 中国农机化学报, 2018, 39(3): 55–60.
ZHANG Chengbao, SUN Yitian, ZHONG Bo, et al. Research on intelligent control process of 9YYB12 greenfeed banding & wrapping AIO machine[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2018, 39(3): 55–60. (in Chinese)
- [98] 张成保, 刘学峰, 李青江, 等. 9YYB12 型智能青饲料打捆缠膜一体机液压系统的设计[J]. 农机化研究, 2019, 41(7): 116–120.
ZHANG Chengbao, LIU Xuefeng, LI Qingjiang, et al. The design research of model 9YYB12 intelligent greenfeed banding wrapping AIO machine hydraulic system[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(7): 116–120. (in Chinese)
- [99] 黄文娟. 青干草调制、贮存及利用[J]. 草业与畜牧, 2008(9): 48–49.
- [100] 鲁宏彪. 青干草的调制、贮存与利用[J]. 甘肃畜牧兽医, 2018, 48(1): 84–85.
- [101] 化宏丽, 贾德宏, 王世诚. 青干草调制技术[J]. 中国牛业科学, 2019, 45(4): 63–64.
HUA Hongli, JIA Dehong, WANG Shicheng. Modulation technology of green hay[J]. China Cattle Science, 2019, 45(4): 63–64. (in Chinese)
- [102] 侯建杰. 高寒牧区燕麦青干草品质的影响因素研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2013.
HOU Jianjie. Study on the influence factors on the nutritional quality of oat hay in alpine meadow pasture[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- [103] 杨世昆, 苏正范. 饲草生产机械与设备[M]. 北京: 中国农业出版社, 2009.
- [104] 杨莉. 牧草割草机研究现状与发展趋势[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(11): 35–40, 72.
YANG Li. Research situation and development tendency of herbage mower[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(11): 35–40, 72. (in Chinese)
- [105] 侯建杰, 赵桂琴, 焦婷, 等. 不同含水量及晒制方法对燕麦青干草品质的影响[J]. 中国草地学报, 2014, 36(1): 69–74.
HOU Jianjie, ZHAO Guiqin, JIAO Ting, et al. Effects of moisture contents and drying methods on oat hay quality[J]. Chinese Journal of Grassland, 2014, 36(1): 69–74. (in Chinese)
- [106] 高东明, 王德成, 郝丽颖, 等. 割草调制机的调制机构设计与试验[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2013, 34(3): 287–292.
GAO Dongming, WANG Decheng, HAO Liying, et al. Design and experiment of new conditioning mechanism for mower conditioner[J]. Journal of Jiangsu University(Natural Science Edition), 2013, 34(3): 287–292. (in Chinese)
- [107] 赵春花, 韩正晟, 曹致中. 前置式齿型链割草压扁机的研制[J]. 中国农机化, 2010(3): 67–70.
ZHAO Chunhua, HAN Zhengsheng, CAO Zhizhong. Research and test on prefix haybine of the toothed-chain[J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2010(3): 67–70. (in Chinese)
- [108] 邬备, 王德成, 王光辉, 等. 割草机切割压扁装置运行参数优化与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(10): 76–83.
WU Bei, WANG Decheng, WANG Guanghui, et al. Optimization and experiments of cut-condition device working parameter

- on mower conditioner[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(10): 76–83. (in Chinese)
- [109] 陈凯, 赵春花, 罗亚兰, 等. 牧草压扁机压扁间隙调节装置的设计与试验研究[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(3): 278–282.
CHEN Kai, ZHAO Chunhua, LUO Yalan, et al. Design and test research of flattening gap adjustment device of mower conditioner[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(3): 278–282. (in Chinese)
- [110] 杨天兴, 魏万华, 赵春花. 小型割草压扁机压扁系统的试验研究[J]. 甘肃农业大学学报, 2017, 52(6): 159–163.
YANG Tianxing, WEI Wanhua, ZHAO Chunhua. Experimental research on the flatten device of small-scale forage crusher[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2017, 52(6): 159–163. (in Chinese)
- [111] 凌旭, 赵春花. 小型割草压扁机仿形装置设计与仿真[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(7): 63–67, 74.
LING Xu, ZHAO Chunhua. Design and simulation of profiling device of small forage crusher[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(7): 63–67, 74. (in Chinese)
- [112] 马世伦, 赵春花, 陈凯. 小型牧草割压机拨禾轮的设计与试验研究[J]. 农业装备与车辆工程, 2015, 53(7): 26–29.
MA Shilun, ZHAO Chunhua, CHEN Kai. Design and experimental research on the reel of small forage cutting flattening machine[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2015, 53(7): 26–29. (in Chinese)
- [113] 王聪伟, 张宁, 包德胜, 等. 国内外典型搂草机对比分析及国内搂草机发展建议[J]. 农业工程, 2021, 11(2): 6–11.
WANG Congwei, ZHANG Ning, BAO Desheng, et al. Comparative analysis of typical rake at home and abroad and development suggestions of domestic rake[J]. Agricultural Engineering, 2021, 11(2): 6–11. (in Chinese)
- [114] 翟改霞, 包德胜, 李凤鸣, 等. 国内外牧草搂集技术及典型设备分析[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(12): 198–202.
ZHAI Gaixia, BAO Desheng, LI Fengming, et al. Domestic and international analysis on raking technology and typical device of forages[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(12): 198–202. (in Chinese)
- [115] 孟修丹. 国外搂草机械发展概况[J]. 农业工程, 2015, 5(4): 19–22.
MENG Xiudan. Development situation of raker machine in foreign countries[J]. Agricultural Engineering, 2015, 5(4): 19–22. (in Chinese)
- [116] 杨莉. 搂草机发展现状与趋势[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(4): 57–64.
YANG Li. Development status and tendency of rake swather[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(4): 57–64. (in Chinese)
- [117] 周莹. 方草捆打捆机发展现状分析[J]. 南方农机, 2016, 47(5): 11, 13.
- [118] 沈亮, 冯艳辉, 李景岩, 等. 关于方捆打捆机的研究应用与发展趋势分析[J]. 农机使用与维修, 2018(12): 19–21.
- [119] 王锋德, 陈志, 王俊友, 等. 4YF-1300型大方捆打捆机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2009, 40(11): 36–41.
WANG Fengde, CHEN Zhi, WANG Junyou, et al. Design and experiment of 4YF-1300 large rectangular baler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(11): 36–41. (in Chinese)
- [120] 杨莉, 刘贵林, 王振华, 等. 自带传动动力恒频方草捆捡拾压捆机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(增刊): 147–151.
YANG Li, LIU Guilin, WANG Zhenhua, et al. Design and experiment of engine-driven constant frequency rectangular pickup baler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(Supp.): 147–151. (in Chinese)
- [121] 尹建军, 刘丹萍, 李耀明. 方捆机捡拾器高度自动仿形装置参数分析与试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(8): 86–92.
YIN Jianjun, LIU Danping, LI Yaoming. Design and parameters analyses of automatic height profiling device of quadrate-bale baler pickup[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 86–92. (in Chinese)
- [122] 雷昌毅, 陈建能, 李鹏鹏, 等. 非圆齿轮-曲柄滑块压捆机构反求设计[J]. 农业工程学报, 2012, 28(13): 22–27.
LEI Changyi, CHEN Jianneng, LI Pengpeng, et al. Reverse design of non-circular gear-crank slider hay baler mechanism[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(13): 22–27. (in Chinese)
- [123] 苏刚, 史建新, 葛炬. 基于逆向工程的方捆机打结器空间角度测量[J]. 农业机械学报, 2008, 39(6): 81–83.
SU Gang, SHI Jianxin, GE Ju. Measurement the spatial angle of square knotter on the basis of reverse engineering[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(6): 81–83. (in Chinese)
- [124] 李慧, 何进, 李洪文, 等. 方草捆压捆机打结器空间参数研究[J]. 农业机械学报, 2013, 44(8): 99–105.
LI Hui, HE Jin, LI Hongwen, et al. Spatial parameters of knotters of square balers[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(8): 99–105. (in Chinese)
- [125] 尹建军, 李双, 李耀明. D型打结器及其辅助机构运动仿真与时序分析[J]. 农业机械学报, 2011, 42(6): 103–107.
YIN Jianjun, LI Shuang, LI Yaoming. Kinematic simulation and time series analysis of D-knotter and its ancillary mechanisms[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(6): 103–107. (in Chinese)
- [126] 李双. D型打结器的捆绳成结原理与优化设计[D]. 镇江: 江苏大学, 2011.
LI Shuang. Rope-tied theory and optimal design of D-knotter[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2011. (in Chinese)
- [127] 李慧, 李洪文, 何进, 等. 方草压捆机D型打结器驱动齿盘重建与优化[J]. 农业工程学报, 2010, 26(5): 96–102, 385.
LI Hui, LI Hongwen, HE Jin, et al. Reconstruction and optimal design of driving dentate disc of D-bale knotter based on reverse engineering[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(5): 96–102. (in Chinese)
- [128] 孙贵斌, 李明利, 孟伟, 等. 卡扣式方草捆打结器的设计[J]. 农业机械学报, 2008, 39(12): 161, 210–212.
- [129] 张姬, 耿浩, 耿爱军, 等. 卡扣式方草捆打结器的集成与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(6): 64–68.
ZHANG Ji, GENG Hao, GENG Aijun, et al. Integration and experiment of clip bale knotter[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(6): 64–68. (in Chinese)

[130] 耿浩,张姬,崔桐瑞,等. 气动卡扣打结器的设计与试验[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2016, 47(5): 726 – 730.
GENG Hao, ZHANG Ji, CUI Tongrui, et al. Design and experiment of the pneumatic buckle knotter[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2016, 47(5): 726 – 730. (in Chinese)

[131] 郭辉,高国民,周伟,等. 轮式自走方捆打捆机行走速度控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(12): 107 – 114.
GUO Hui, GAO Guomin, ZHOU Wei, et al. Design and test of automatic control system for walking speed of wheeled self propelled square baler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(12): 107 – 114. (in Chinese)

[132] 张安琪,孟志军,陈立平,等. 小型方捆机草捆动态称量系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(10): 170 – 175, 185.
ZHANG Anqi, MENG Zhijun, CHEN Liping, et al. Design and experiment of dynamic weighing system for small square baler [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 170 – 175,185. (in Chinese)

[133] 张安琪,孟志军,陈立平,等. 小型方捆机草捆动态称量系统信号分析与处理[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊2): 243 – 248, 260.
ZHANG Anqi, MENG Zhijun, CHEN Liping, et al. Signal analysis and processing of dynamic weighing system for small square baler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp.2): 243 – 248, 260. (in Chinese)

[134] 赵楠,李博文. 燕麦籽粒机械力学特性的研究[J]. 中国农业信息, 2017(4): 54 – 56.

[135] ZHU Y D, FU N, LI D, et al. Physical and viscoelastic properties of different moisture content highland barley kernels[J]. International Journal of Food Engineering,2017, 13(12): 1 – 11.

[136] ZHAO N, FU N, LI D, et al. Study on mechanical properties for shearing breakage of oat kernel[J]. International Journal of Food Engineering, 2018, 14(2): 1 – 9.

[137] 吴敏,潘虹宇,赵东林,等. 燕麦茎秆理化组分分析与动态力学特性研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊): 447 – 455.
WU Min, PAN Hongyu, ZHAO Donglin, et al. Analysis of physicochemical composition and dynamic mechanical properties of *Avena sativa* stalk[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(Supp.):447 – 455. (in Chinese)

[138] 马玉哲. 钉齿式裸燕麦单轴流脱粒与分离装置设计与试验[D]. 大庆:黑龙江八一农垦大学, 2021.

[139] 赵瑞男. 裸燕麦全钉齿式轴流脱粒与分离装置性能试验研究[D]. 大庆:黑龙江八一农垦大学, 2020.

[140] 赵瑞男,毛欣,衣淑娟,等. 裸燕麦脱粒与分离装置的两种脱粒滚筒对比试验研究[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(8): 7 – 12.
ZHAN Ruinan, MAO Xin, YI Shujuan, et al. Comparative experimental study on two threshing rollers of bare oats threshing and separating device[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(8): 7 – 12. (in Chinese)

[141] 孙成龙,左杰文,卢富运,等. 燕麦脱粒组合式轴流滚筒设计与试验[J]. 农机化研究, 2021, 43(6): 135 – 141, 151.
SUN Chenglong, ZUO Jiewen, LU Fuyun, et al. Design and test of combined axial flow roller for oats threshing[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(6): 135 – 141, 151. (in Chinese)

[142] 耿令新,孙成龙,左杰文,等. 燕麦籽粒揉搓式除杂装置设计[J]. 农业工程学报, 2019, 35(11): 38 – 47.
GENG Lingxin, SUN Chenglong, ZUO Jiewen, et al. Design on oat-grains purification device with rubbing roller [J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(11): 38 – 47. (in Chinese)

[143] 侯华铭,崔清亮,郭玉明,等. 气吹式粮油作物脱出物清选悬浮速度测量装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(16): 43 – 49.
HOU Huaming, CUI Qingliang, GUO Yuming, et al. Design and test of air-sweeping suspension velocity testing device for cleaning threshed materials of grain and oil crops[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(16): 43 – 49. (in Chinese)

[144] 李心平,赵高源,姬江涛,等. 燕麦弧形栅格筛复清选式圆筒筛清选装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(5): 124 – 133.
LI Xinping, ZHAO Gaoyuan, JI Jiangtao, et al. Design and test of cylinder screen oat cleaning device with arc grid sieves and re-cleaning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(5):124 – 133. (in Chinese)